ELECTRÓNICA APLICADA

Índice

Prólogo xiii

1. La electricidad. Conceptos generales 1

1.1. Producción y consumo de la electricidad 2
1.2. Efectos de la electricidad 2
1.3. La electricidad 3
1.4. Electricidad estática 5
1.5. Carga eléctrica 6
1.5.1. Ley de Coulomb 6
1.5.2. Campo eléctrico 6
1.6. Movimiento de electrones 6
1.6.1. Electricidad atmosférica 7
1.7. El circuito eléctrico 8
1.8. Formas de producir electricidad 9
1.8.1. Producción de electricidad por frotamiento 9
1.8.2. Producción de electricidad por reacción química 10
1.8.3. Producción de electricidad por presión .. 10
1.8.4. Producción de electricidad por acción de la luz 11
1.8.5. Producción de electricidad por acción del calor 11
1.8.6. Producción de electricidad por acción mágnetica 11
1.9. Intensidad de la corriente eléctrica 12
1.10. Sentido real y convencional de la corriente .. 12
1.11. Movimiento de electrones en un circuito 12
1.12. Medida de la intensidad de la corriente eléctrica 13
1.13. Corriente continua (C.C.) 13
1.14. Corriente alterna (C.A.) 14
1.15. Tensión eléctrica y fuerza electromotriz 14
1.16. Medida de la tensión 15

Actividades de enseñanza aprendizaje 16

2. Resistencia, potencia y energía eléctrica 17

2.1. Conductores y aislantes 18
2.2. Resistencia eléctrica 18
2.3. Medida de la resistencia eléctrica 19
2.4. La ley de Ohm 19
2.5. Potencia eléctrica 20
2.5.1. Medida de la potencia eléctrica 22
2.6. Energía eléctrica 22
2.7. El efecto Joule 22

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

2.8. Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas 23
2.8.1. El cortocircuito 23
2.8.2. La sobrecarga 23
2.8.3. Fusibles 23
2.9. Resistencia de un conductor 24
2.10. Influencia de la temperatura sobre la resistividad 26
2.11. Resistencias para circuitos electrónicos 28
2.11.1. Tolerancia de una resistencia 28
2.11.2. Código de colores 28
2.11.3. Potencia de disipación de una resistencia 30
2.11.4. Clasificación de las resistencias 30
2.11.5. Resistencias fijas 30
2.11.6. Resistencias variables 31
2.11.7. Resistencias dependientes 31
2.11.7.1. Resistencias dependientes de la temperatura 31
2.11.7.2. Resistencias dependientes de la luz (LDR) 32
2.11.7.3. Resistencias dependientes de la tensión (VDR) 33
2.11.7.4. Magneto resistores (MDR) y bandas extensiométricas ... 33
Actividades de enseñanza aprendizaje 34

3. Resolución de circuitos en corriente continua 37

3.1. Acoplamiento de receptores en serie 38
3.2. Acoplamiento de receptores en paralelo 42
3.3. Circuitos mixtos 45
3.4. Conexión de generadores 47
3.4.1. Tensión en bornes del generador 47
3.4.2. Potencia del generador 48
3.5. Conexión de generadores en serie 49
3.6. Conexión de generadores en paralelo 49
3.7. Leyes de Kirchhoff 50
Actividades de enseñanza aprendizaje 54

4. Los condensadores 57

4.1. Funcionamiento de un condensador 58
4.2. Capacidad de un condensador 59
4.3. Carga de un condensador 60
4.4. Descarga de un condensador 61
4.5. Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador 61
4.6. Especificaciones técnicas de los condensadores 62
4.7. Tipos de condensadores 62
4.7.1. Condensadores de papel impregnado ... 63
4.7.2. Condensadores de papel metalizado ... 63
4.7.3. Condensadores de plástico 63
4.7.4. Condensadores cerámicos 63
4.7.5. Condensadores de mica 63
4.7.6. Condensadores electrolíticos de aluminio .. 63
4.8. Identificación de los valores de los condensadores 64
4.9. Asociación de condensadores 65
4.9.1. Asociación de condensadores en serie .. 65
4.9.2. Asociación en paralelo 67
Actividades de enseñanza aprendizaje 68

5. Magnetismo y electromagnetismo 71

5.1. Imanes 72
5.1.1. Polos de un imán 72
5.1.2. Brújula 72
5.1.3. Clases de imanes 72
5.1.4. Teoría molecular de los imanes 73
5.1.5. Campo magnético de un imán 73
5.2. Electromagnetismo 74
5.2.1. Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica 74
5.2.2. Campo magnético en un conductor en forma de anillo 74
5.2.3. Campo magnético formado por una bobina 75
5.3. Magnitudes magnéticas 75
5.3.1. Flujo magnético (Φ) 75
5.3.2. Inducción magnética (B) 75
5.3.3. Fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$) 76
5.3.4. Intensidad de campo magnético (H) ... 76
5.3.5. Reluctancia ($\Re$) 77
5.3.6. Curva de magnetización. Saturación magnética 77
5.3.7. Permeabilidad magnética 78
5.4. Electroimanes 79
5.5. Inducción electromagnética 81
5.5.1. Experiencia de Faraday 81
5.5.2. Sentido de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz 82
5.5.3. Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo 82

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

5.5.4. Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética 83
5.6. Autoinducción. Bobinas 84
5.6.1. Coeficiente de autoinducción 85
5.6.2. Bobinas o inductores como componentes electrónicos 86
5.7. Compatibilidad electromagnética 86
Actividades de enseñanza aprendizaje 88

6. La corriente alterna 91

6.1. Producción de una corriente alterna 92
6.2. Valores característicos de la C.A. 93
6.2.1. Valor instantáneo 94
6.2.2. Valor máximo de la tensión 94
6.2.3. Tensión eficaz 94
6.2.4. Intensidad eficaz 94
6.2.5. Valor medio del ciclo completo 94
6.2.6. Ciclo o período 95
6.2.7. Frecuencia 95
6.2.8. Relación entre la frecuencia y la velocidad angular 95
6.3. Receptores elementales en corriente alterna ... 96
6.3.1. Circuito con resistencia pura 96
6.3.2. Circuito con bobina 97
6.3.2.1. Reactancia inductiva de una bobina 98
6.3.2.2. Potencia en una bobina 98
6.3.3. Circuito con condensador 99
6.3.3.1. Reactancia capacitiva de un condensador 100
6.3.3.2. Potencia en un condensador ... 100
6.3.4. Resumen de los efectos producidos por los receptores elementales 101
Actividades de enseñanza aprendizaje 102

7. Resolución de circuitos en C.A. 105

7.1. Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias 106
7.1.1. Triángulo de tensiones 107
7.1.2. Triángulo de impedancias 107
7.1.3. Potencia en un circuito R-L 108
7.2. Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores 110
7.3. Circuito en serie R-L-C 112
7.4. Importancia práctica del factor de potencia (cos φ) 114
7.4.1. Corrección del factor de potencia mediante condensadores 116
7.4.2. Tipos de compensación de la energía reactiva 117
7.5. Circuitos oscilantes 118
7.5.1. Resonancia 118
7.5.2. Resonancia en serie 119
7.5.3. Resonancia en paralelo 119
Actividades de enseñanza aprendizaje 120

8. Sistemas trifásicos 123

8.1. Ventajas del uso de sistema trifásicos 124
8.2. Generación de un sistema de C.A. trifásica ... 124
8.2.1. Conexión del alternador en estrella 126
8.3. Conexión de los receptores 127
8.3.1. Carga equilibrada en estrella 127
8.3.2. Carga equilibrada en triángulo 128
8.4. Corrección del factor de potencia 130
8.5. Componentes armónicas en C.A. 130
8.5.1. Características de los armónicos 131
8.5.2. Efectos que producen los armónicos ... 132
8.5.3. Medida de los armónicos 132
8.5.4. Sistemas para la compensación de armónicos 133
Actividades de enseñanza aprendizaje 134

9. Instrumentación en el laboratorio de electrónica .. 137

9.1. Errores absolutos y relativos en la medida 138
9.2. Normas generales para la toma de medidas eléctricas 138
9.3. Instrumentos de medida analógicos y digitales .. 139
9.4. Medida de la intensidad 140
9.5. Medidas de tensión 140
9.6. El polímetro 141
9.7. El osciloscopio 142
9.7.1. Manejo del osciloscopio 143
9.7.2. El osciloscopio digital 144
9.8. Generador de funciones 145
9.9. Instrumentación digital 146
9.9.1. La sonda lógica 146
9.9.2. El inyector o pulsador lógico 146
9.9.3. El analizador lógico 146
Actividades de enseñanza aprendizaje 147

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

10. Semiconductores. El diodo 149

10.1. Los semiconductores 150
10.2. El diodo como semiconductor 150
10.3. Características atómicas del silicio 151
10.4. El diodo de unión 152
10.4.1. Características en polarización directa de un diodo 152
10.4.2. Características en polarización inversa de un diodo 153
10.4.3. Potencia y corriente nominal 154
10.4.4. Línea de carga de un diodo 154
10.4.5. Característica aproximada de un diodo 155
10.5. Dispositivos optoelectrónicos 156
10.5.1. Diodos luminiscentes (LED) 156
10.5.1.1. Características de los LED .. 157
10.5.2. Fotodiodos 157
Actividades de enseñanza aprendizaje 159

11. Aplicación de los diodos a circuitos de rectificación 163

11.1. Circuitos de rectificación 164
11.2. El transformador 164
11.2.1. Potencia nominal de un transformador .. 165
11.3. Circuito rectificador de media onda 165
11.4. Circuito rectificador de onda completa 166
11.4.1. Rectificador de onda completa mediante transformador con toma intermedia .. 167
11.4.2. El puente rectificador 169
11.5. Rectificadores trifásicos 170
11.5.1. Circuito rectificador trifásico de media onda 170
11.5.2. Circuito rectificador trifásico de onda completa 170
11.6. El filtrado 171
11.6.1. Filtro con condensador 171
11.6.2. Filtros con inductancias y condensadores 174
11.7. Construcción del circuito impreso y montaje de sus componentes 175
11.7.1. Diseño de los circuitos impresos 175
11.7.2. Transferencia del diseño a placa 176
11.7.3. Soldadura y montaje de componentes .. 177
Actividades de enseñanza aprendizaje 177

12. Transistores 183

12.1. Transistores bipolares 184
12.2. Funcionamiento del transistor 184
12.3. Identificación de transistores 186
12.4. Comprobación del estado de un transistor .. 187
12.5. Intensidades de corriente en el transistor ... 188
12.6. Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor 188
12.7. Tensiones de ruptura 189
12.8. Características de los transistores bipolares .. 190
12.8.1. Curvas características con el emisor común (EC) 190
12.8.2. Curva de potencia máxima de un transistor 192
12.8.3. Recta de carga de un transistor 194
12.9. Polarización del transistor 196
12.9.1. Polarización de base de un transistor mediante dos fuentes de alimentación 196
12.9.2. Polarización de un transistor con una sola fuente de alimentación 199
12.9.3. Polarización por realimentación del emisor 199
12.9.4. Polarización por realimentación del colector 199
12.9.5. Polarización del transistor por realimentación del emisor con divisor de tensión 200
12.10. Fototransistores 201
Actividades de enseñanza aprendizaje 202

13. Amplificadores 207

13.1. Características del amplificador 208
13.1.1. Ganancia de un amplificador 208
13.1.2. Adaptación de impedancias en un amplificador 209
13.1.3. Clasificación de los amplificadores .. 210
13.2. Amplificadores de pequeña señal con transistores 212
13.2.1. Amplificador de emisor común 212
13.2.2. Amplificador de colector común (C.C.) 214

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

13.2.3. Amplificador de base común (BC) .. 215
13.2.4. Cuadro resumen de las características de los amplificadores 216
13.3. Acoplamiento de amplificadores 216
13.3.1. Acoplamiento con condensador o RC 216
13.3.2. Acoplamiento directo 217
13.3.3. Amplificador Darlington 217
13.4. Amplificadores de potencia 218
13.4.1. Rendimiento de un amplificador 218
13.4.2. Amplificadores de potencia clase A .. 219
13.4.3. Amplificador de potencia clase B ... 221
13.4.4. Amplificador de potencia clase AB .. 223
13.4.5. Amplificadores integrados de potencia .. 224
13.5. Localización de averías y reparación en un amplificador 224
13.5.1. Ausencia de señal de salida 225
13.5.2. Señal de salida débil 226
13.5.3. Distorsión y ruido en la señal de salida 227
Actividades de enseñanza aprendizaje 228

14. Amplificadores con transistores de efecto de campo 233
14.1. El transistor FET 234
14.1.1. Curvas características de drenador de un FET 235
14.1.2. Corriente de fuga de graduador o compuerta 235
14.1.3. Impedancia de entrada 235
14.1.4. Curvas de transferencia o transconductancia 236
14.1.5. Diferencias entre un transistor bipolar y uno unipolar 236
14.1.6. Aplicaciones del FET 236
14.2. El transistor MOSFET 237
14.2.1. MOSFET de tipo de empobrecimiento 237
14.2.2. MOSFET de enriquecimiento 238
14.2.3. Protección de los MOSFET 239
14.3. Amplificadores con transistores FET 239
14.3.1. Amplificador de surtidor común «SC» .. 240
14.3.2. Amplificador con surtidor común con polarización de una sola fuente 241
14.3.3. Amplificador con surtidor común con polarización por divisor de tensión .. 242
14.3.4. Amplificador de drenador común, «DC» 243
14.4. Amplificadores con MOSFET 244
Actividades de enseñanza aprendizaje 244

15. El amplificador operacional 247
15.1. Distorsión en los amplificadores 248
15.1.1. Distorsión alineal 248
15.1.2. Distorsión de frecuencia y ancho de banda de un amplificador 248
15.1.3. Distorsión de fase 249
15.2. Realimentación en los amplificadores 249
15.2.1. Principio de realimentación 250
15.2.2. Ventajas de la realimentación 250
15.3. El amplificador operacional 251
15.3.1. El amplificador diferencial 252
15.3.2. Características del amplificador operacional 253
15.3.3. Realimentación en los amplificadores operacionales 254
15.3.3.1. AO con realimentación no inversora de tensión 254
15.3.3.2. AO con realimentación inversora de tensión 255
15.3.3.3. AO con realimentación no inversora de corriente 256
15.3.3.4. AO con realimentación inversora de corriente 257
15.4. Aplicaciones de los amplificadores operacionales 257
15.4.1. Amplificador sumador 258
15.4.2. Amplificador restador 258
15.4.3. Comparadores 258
15.4.4. Filtros activos 259
15.4.5. Amplificadores integradores y diferenciadores 261
Actividades de enseñanza aprendizaje 262

16. Fuentes de alimentación 267
16.1. El diodo Zener 268
16.1.1. Características del diodo Zener 268
16.1.2. El Zener como regulador de tensión .. 269
16.1.3. El diodo Zener ideal 271
16.2. Fuentes de alimentación estabilizadas en serie y paralelo 271

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

16.2.1. Estabilizadores en paralelo 272
16.2.2. Estabilizadores en serie 272
16.2.3. Estabilizador en serie con realimentación 274
16.2.4. Estabilizador con amplificador operacional 275
16.3. Fuentes estabilizadas de tensión ajustable ... 275
16.4. Características de una fuente de alimentación 276
16.5. Fuentes de alimentación con reguladores de tensión integrados 278
16.5.1. La serie de reguladores 7800 279
16.5.2. Reguladores integrados con tensión ajustable 279
16.5.3. Fuente de corriente con regulador integrado 280
16.6. Fuentes de alimentación conmutadas 281
Actividades de enseñanza aprendizaje 282

17. Generadores de señal y osciladores 287

17.1. Generadores senoidales 288
17.1.1. Principio general de oscilación 288
17.1.2. Osciladores RC 289
17.1.3. Osciladores LC 292
17.1.4. Osciladores de cristal 293
17.2. Multivibradores 294
17.2.1. Multivibrador astable 294
17.3. El circuito integrado 555 296
17.3.1. Funcionamiento del CI 555 en modo astable 297
17.3.2. Funcionamiento del CI 555 en modo monoestable 298
17.4. Osciladores integrados 300
Actividades de enseñanza aprendizaje 300

18. Electrónica de potencia-tiristores 305

18.1. Tiristores 306
18.2. El rectificador controlado de silicio (SCR) .. 306
18.2.1. Curvas características del SCR 307
18.2.2. Aplicaciones del SCR 308
18.2.3. Control de potencia en C.C. con un SCR 308
18.2.4. Control de potencia en C.A. con un SCR 308
18.3. El diac 308
18.3.1. SCR controlado por diac 309
18.4. El triac 310
18.5. El transistor de unijuntura (UJT) 311
18.5.1. Aplicaciones del UJT 312
18.6. Modulación PWM 313
Actividades de enseñanza aprendizaje 315

19. Introducción a la electrónica digital 319

19.1. Electrónica analógica y electrónica digital ... 320
19.1.1. Señales analógicas 320
19.1.2. Señales digitales 321
19.2. Sistemas de numeración 323
19.2.1. Sistema decimal 323
19.2.2. Sistema binario 324
19.2.3. Sistema octal y hexadecimal 324
19.3. Códigos 325
19.3.1. Código BCD natural 325
19.3.2. Código ASCII 326
19.4. Niveles lógicos de las señales digitales 326
19.5. Puertas lógicas 327
19.5.1. Puerta O (OR) 327
19.5.2. Puerta Y (AND) 328
19.5.3. Puerta inversora NOT 328
19.5.4. Puerta NO O (NOR) 328
19.5.5. Puerta NO Y (NAND) 328
19.5.6. Puerta O exclusiva (XOR) 329
19.5.7. Puerta NO XOR (XNOR) 329
19.6. Diseño de circuitos combinacionales con puertas lógicas 329
19.7. Construcción de puertas lógicas con circuitos integrados 330
19.8. Familias lógicas 332
19.8.1. Características de una familia lógica .. 332
19.8.2. Comparativa entre las familias lógicas .. 334
19.8.3. Familia lógica TTL 335
19.8.4. Familia lógica CMOS 336
19.8.5. Precauciones con los circuitos CMOS 337
Actividades de enseñanza aprendizaje 338

20. Diseño de circuitos con puertas lógicas 345

20.1. Álgebra de Boole 346
20.1.1. Postulados 346

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

20.1.2. Propiedades 346
20.1.3. Teoremas 346
20.2. Simplificación algebraica de funciones lógicas 347
20.3. Simplificación de funciones lógicas mediante el mapa de Karnaugh 348
20.3.1. Mapa de Karnaugh para dos variables 348
20.3.2. Mapa de Karnaugh para tres variables 349
20.3.3. Mapa de Karnaugh para cuatro variables 350
20.4. Diseño de circuitos combinacionales con puertas NAND y NOR 351
20.5. Diseño de circuitos combinacionales 351
Actividades de enseñanza aprendizaje 353

21. Bloques combinacionales en escala de integración media (MSI) 355

21.1. Diferencia entre un sistema combinacional y otro secuencial 356
21.2. Multiplexores 356
21.2.1. Diseño de un multiplexor de dos entradas 356
21.2.2. Diseño de un multiplexor de cuatro entradas 357
21.2.3. El multiplexor como bloque combinacional 358
21.2.4. Multiplexor MSI de ocho entradas .. 358
21.2.5. Aumento de la capacidad de un multiplexor 358
21.2.6. Generación de funciones lógicas con multiplexores 359
21.3. Demultiplexores 359
21.4. Decodificadores 360
21.4.1. Generación de funciones lógicas con un decodificador 361
21.4.2. Decodificador BCD a 7 segmentos .. 362
21.5. Codificadores 364
21.5.1. Codificador con prioridad decimal a BCD 364
21.6. Convertidores de datos entre los sistemas analógicos y digitales 365
21.6.1. Conversor digital-analógico D/A (DAC) 365
21.6.1.1. Resolución de un convertidor D/A 366
21.6.1.2. Convertidor D/A de resistencias ponderadas 367
21.6.1.3. Convertidor D/A de resistencias *R*-2*R* en escalera ... 367
21.6.1.4. Convertidores D/A comerciales 367
21.6.2. Conversor analógico digital A/D (ADC) 368
21.6.2.1. Tipos de convertidores A/D 369
21.6.2.2. Convertidores A/D comerciales 370
Actividades de enseñanza aprendizaje 372

22. Sistemas secuenciales 377

22.1. Realimentación en un circuito digital 378
22.1.1. Realimentación en un circuito estable .. 378
22.1.2. Realimentación en un circuito biestable 378
22.2. Biestable *R-S* 379
22.2.1. Biestable *R-S* síncrono activado por nivel 380
22.2.2. Biestable *R-S* síncrono activado por flancos de reloj 381
22.3. Biestable *J-K* asíncrono 381
22.3.1. Biestable *J-K* síncrono 382
22.3.2. Biestable *J-K* maestro-esclavo 382
22.4. Biestable *D* síncrono activado por flanco 383
22.5. Biestable síncrono *T* 384
22.6. Biestables síncronos integrados con señales de Preset y Clear 384
22.7. Registros 385
22.7.1. Registros de almacenamiento 385
22.7.2. Registros de desplazamiento 386
22.7.2.1. Registro de desplazamiento con entrada serie y salida serie 387
22.7.2.2. Registro de desplazamiento con entrada serie y salida paralelo 387
22.7.2.3. Registro de desplazamiento con entrada paralelo y salida serie 387
22.7.2.4. Registros de desplazamiento bidireccionales y universales 388
22.8. Contadores 388
22.8.1. Contadores asíncronos 389
22.8.2. Contadores síncronos 389
Actividades de enseñanza aprendizaje 390

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

23. Circuitos microprogramables 395

23.1. Introducción 396
23.2. Controlador, microprocesador y microcontrolador 396
23.3. Un poco de historia 397
23.4. Estructura de un microprocesador 398
23.4.1. Unidad de control 399
23.4.2. Unidad aritmético-lógica (ALU) 400
23.4.3. Registros 400
23.5. Controladores programables construidos con microprocesadores 400
23.5.1. Memoria 400
23.5.2. Unidad de entrada/salida. Periféricos .. 401
23.5.3. Buses del sistema 402
23.5.4. Conjunto de instrucciones-Software .. 402
23.6. Microcontroladores 403
23.6.1. Programación de microcontroladores 405
23.6.2. Iniciación a la programación de microcontroladores con la placa Home Work 405
23.6.2.1. Características de la placa Home Work 406
23.7. Programando con el lenguaje PBASIC 407
Actividades de enseñanza aprendizaje 409

Solución a los ejercicios de autoevaluación 413

Recursos web de aprendizaje 418

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1

La electricidad. Conceptos generales

La electricidad es una de las formas de energía que más ventajas y comodidades aporta a los seres humanos en la actualidad. Con ella conseguimos que funcionen, entre otras, las siguientes aplicaciones: luz con las lámparas eléctricas; calor con cocinas, hornos y calefacciones; frío con frigoríficos y equipos de aire acondicionado; fuerza motriz con motores (ascensores, máquinas herramientas, vehículos eléctricos, electrodomésticos, etc.); sistemas de información, automatización y telecomunicación con ordenadores, microprocesadores, sistemas robotizados, televisores, radio, etc., y muchas otras aplicaciones que con el paso de los años aparecerán.

Contenido

1.1. Producción y consumo de electricidad
1.2. Efectos de la electricidad
1.3. La electricidad
1.4. Electricidad estática
1.5. Carga eléctrica
1.6. Movimiento de electrones
1.7. El circuito eléctrico
1.8. Formas de producir electricidad
1.9. Intensidad de la corriente eléctrica
1.10. Sentido real y convencional de la corriente
1.11. Movimiento de electrones en un circuito
1.12. Medida de la intensidad de la corriente eléctrica
1.13. Corriente continua (C.C.)
1.14. Corriente alterna (C.A.)
1.15. Tensión eléctrica y fuerza electromotriz
1.16. Medida de la tensión
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Entender los procedimientos de producción, transporte y consumo de la electricidad.
- Identificar las partes de un circuito eléctrico.
- Relacionar las magnitudes de un circuito eléctrico con su unidad de medida correspondiente, así como entender el papel de las mismas en el circuito y los aparatos de medida que las miden.
- Diferenciar una C.C. de una C.A.
- Emplear el voltímetro y amperímetro de una forma adecuada.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1.1 Producción y consumo de la electricidad

La electricidad se produce, fundamentalmente, en las centrales eléctricas. Su misión consiste en transformar cualquier forma de energía primaria (hidráulica, térmica, nuclear, solar, etc.) en energía eléctrica. Dada la facilidad con que se transporta la electricidad, por medio de las líneas eléctricas, la ventaja fundamental que conseguimos con esto es que producimos energía eléctrica en las zonas donde podemos acceder con facilidad a la energía primaria, para luego consumirla en ciudades, empresas o cualquier otro centro de consumo (Figura 1.1).

El **generador eléctrico**, que se utiliza habitualmente en una central eléctrica, se basa en un fenómeno que fue descubierto en 1820 por Faraday.

«Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico), en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor» (Figura 1.2).

En un generador eléctrico se hacen mover bobinas en sentido giratorio en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Figura 1.3).

Para transportar la energía eléctrica producida por el generador hasta los centros de consumo se utilizan las líneas eléctricas. Como éstas no son perfectas, ya que poseen resistencia eléctrica, se producen grandes pérdidas de energía en forma de calor.

Para reducir estas pérdidas se utilizan líneas de alta tensión (220.000, 380.000 V). De esta forma, se disminuye la intensidad de la corriente eléctrica y la electricidad puede recorrer grandes distancias con pocas pérdidas.

Los aparatos que consiguen elevar la tensión son los **transformadores eléctricos**. Estos dispositivos solamente funcionan para la corriente alterna.

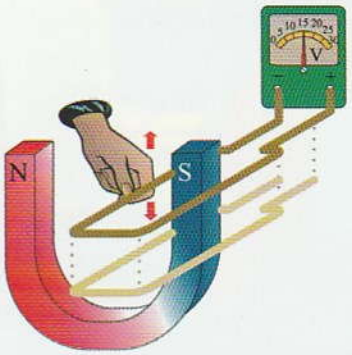


Figura 1.2. Cuando se mueve el conductor dentro de un campo magnético se produce electricidad.

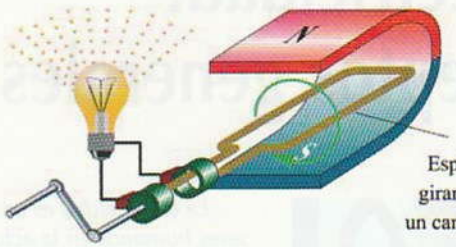


Figura 1.3. Generador eléctrico elemental.

Por último, se sitúan transformadores cerca de los consumidores con el fin de reducir la tensión hasta los 230 o 400 voltios (baja tensión). Estas tensiones son ya mucho menos peligrosas para las personas que utilizan la electricidad.

1.2 Efectos de la electricidad

Pero, ¿qué es exactamente la electricidad? Podríamos decir, que es lo que hace girar los motores, lucir las lámparas, etc., en definitiva, una fuerza, que como tal es invisible y de la cual sólo se notan sus efectos.

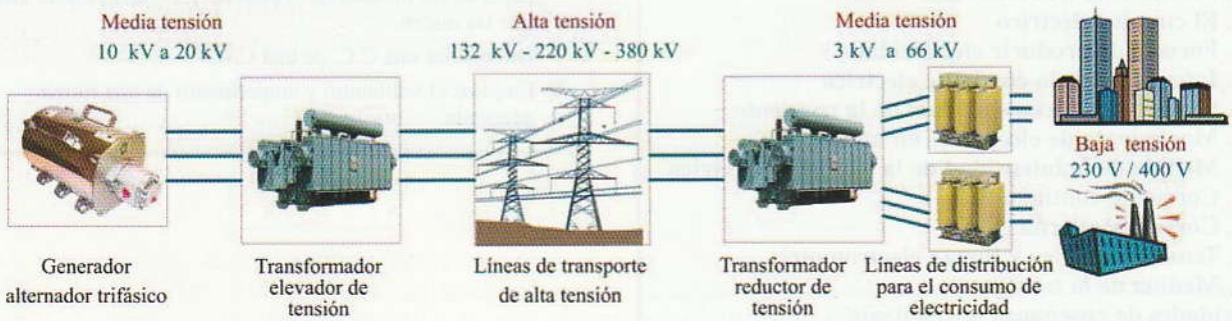


Figura 1.1. Sistema de producción, transporte y distribución de la energía eléctrica.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Los efectos fundamentales que se conocen de la corriente eléctrica son:

Efecto térmico: Al fluir la corriente eléctrica por ciertos materiales conductores, llamados resistivos, como el carbón, se produce calor en los mismos, pudiendo construirse, gracias a este efecto, calefacciones, cocinas, hornos, calentadores de agua, planchas, secadores, etc. (Figura 1.4).

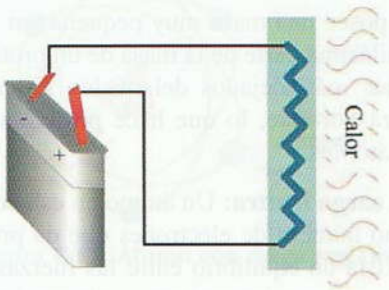


Figura 1.4. **Efecto térmico de la electricidad.**

Efecto luminoso: En una lámpara eléctrica incandescente, al fluir por su filamento resistivo una corriente eléctrica, éste se calienta a altas temperaturas, irradiando luz (Figura 1.5).

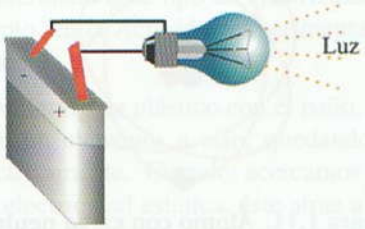


Figura 1.5. **Efecto luminoso de la electricidad.**

Efecto químico: Al fluir la corriente eléctrica por ciertos líquidos, éstos se disgregan, dándose el nombre de electrólisis. Gracias a este efecto se pueden producir productos químicos y metales, baños metálicos (galvanización) y recarga de baterías de acumuladores (Figura 1.6).

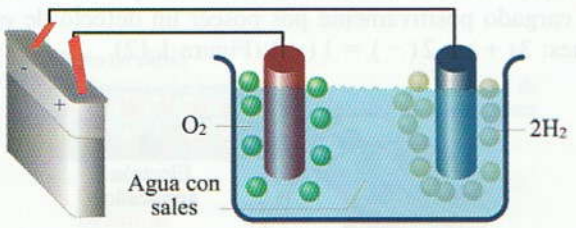


Figura 1.6. **Efecto químico de la electricidad.**

Efecto magnético: Al conectar una bobina a un circuito eléctrico, aquélla produce un campo magnético similar al de un imán, lo que origina un efecto de atracción sobre ciertos metales. Aprovechando este efecto se pueden construir electroimanes, motores eléctricos, altavoces, instrumentos de medida, etc. (Figura 1.7).

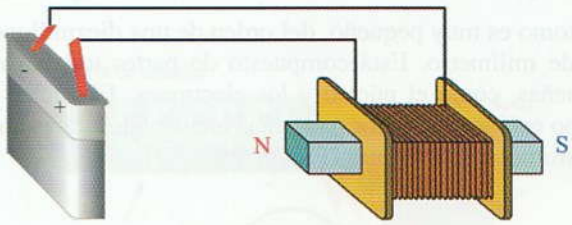


Figura 1.7. **Efecto magnético de la electricidad.**

1.3 La electricidad

La electricidad es una manifestación física que tiene que ver con las modificaciones que se dan en las partes más pequeñas de la materia, en los átomos, y más concretamente en el electrón. Seguidamente, estudiaremos los fenómenos de electrización que se dan en los materiales.

Actividad experimental 1.1

Consigue un bolígrafo de plástico y frótalo con un paño de lana. Seguidamente, acércalo a unos pedacitos de papel (Figura 1.8).

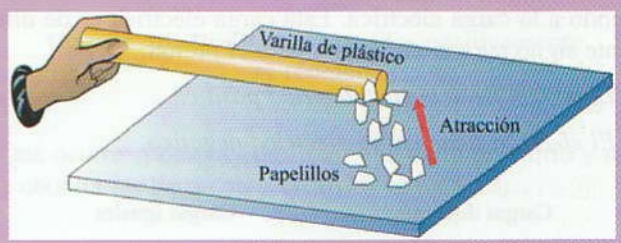


Figura 1.8. **Atracción eléctrica por frotamiento.**

Después de frotar el bolígrafo los trozos de papel son atraídos por aquél, lo que indica que a causa del frotamiento se han desarrollado determinadas fuerzas debido a las cargas eléctricas, que previamente no existían.

Para explicar el fenómeno de electrización observado en la Actividad experimental 1.1 es necesario comprender los cambios que se han producido en las partes más pequeñas de la materia.

Los materiales están compuestos básicamente por moléculas, siendo éstas las partículas más pequeñas que poseen todas las propiedades físicas y químicas del material original. A su vez, estas moléculas se componen de otras

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

partículas más pequeñas, llamadas átomos. Así, por ejemplo, la molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, tal como indica su fórmula química H_2O.

El átomo es muy pequeño, del orden de una diezmillonésima de milímetro. Está compuesto de partes todavía más pequeñas, como el núcleo y los electrones. El núcleo del átomo está formado por partículas elementales, tales como los protones y neutrones (Figura 1.9).

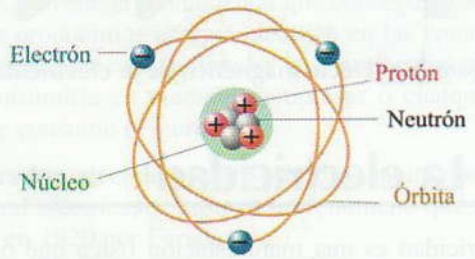


Figura 1.9. Estructura del átomo.

Los electrones giran a gran velocidad en órbitas alrededor del núcleo.

Si fuera posible situar un electrón frente a un protón, se podría observar un fenómeno de atracción. Al contrario, si enfrentamos dos electrones o dos protones éstos se repelen (Figura 1.10). Esto nos indica que tanto el electrón como el protón poseen una propiedad que se manifiesta en forma de fuerzas de atracción y de repulsión; nos estamos refiriendo a la carga eléctrica. Esta carga eléctrica es de diferente signo para el electrón y para el protón:

- *El protón tiene carga eléctrica positiva.*
- *El electrón tiene carga eléctrica negativa.*

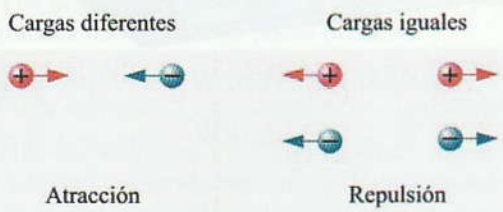


Figura 1.10. Fenómenos de atracción y repulsión en las cargas eléctricas.

En un átomo, los protones se concentran en el núcleo junto a los neutrones y algunas partículas atómicas. A pesar de que los protones poseen carga positiva y que entre ellos existe una gran fuerza repulsiva, éstos se mantienen confinados y muy próximos entre sí en el núcleo, debido a las enormes fuerzas de carácter nuclear. Los neutrones no poseen carga eléctrica y aportan masa al núcleo del átomo.

Los fenómenos que se dan en un átomo son comparables a los que se dan en el sistema solar. El planeta es el electrón y el sol es el núcleo. En un átomo los electrones giran a gran velocidad dentro de sus respectivas órbitas alrededor del núcleo. La fuerza centrífuga que los electrones desarrollan en su giro se ve compensada por la fuerza de atracción que aparece entre los protones de carga positiva situados en el núcleo y dichos electrones.

El electrón posee una masa muy pequeña, en torno a algo más de la milésima parte de la masa de un protón. Además, los electrones más alejados del núcleo son atraídos con menor fuerza por éste, lo que hace posible su movilidad hacia otros átomos.

Átomo con carga neutra: Un átomo en estado normal posee el mismo número de electrones que de protones. Esto hace que exista un equilibrio entre las fuerzas de carácter eléctrico que se dan entre protones y electrones, y por tanto que dicho átomo permanezca eléctricamente neutro. Así, por ejemplo, un átomo de litio posee 3 protones y 3 electrones: $3(+) + 3(-) = 0$ (Figura 1.11).

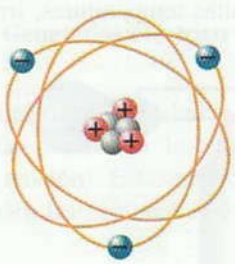


Figura 1.11. Átomo con carga neutra.

Átomo con carga positiva: Si por algún medio consiguiésemos arrancar electrones de las últimas órbitas de los átomos, surgiría un desequilibrio entre el número de cargas negativas y positivas, siendo mayores estas últimas y confiriendo, por tanto, una carga positiva a dicho átomo. Así, por ejemplo, al frotar con un paño el litio, es posible que se arranque un electrón de su última órbita, quedando el átomo cargado positivamente por poseer un defecto de electrones: $3(+) + 2(-) = 1(+)$ (Figura 1.12).

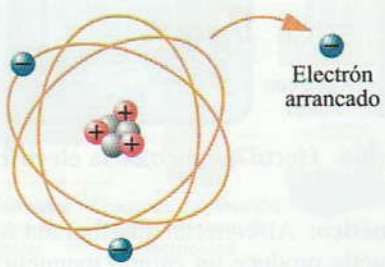


Figura 1.12. Átomo con carga positiva.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Átomo con carga negativa: De la misma manera, si por algún procedimiento conseguimos agregar electrones a un átomo eléctricamente neutro, este exceso de electrones produce una carga negativa en el átomo. En el ejemplo del litio, al añadir un electrón en su última órbita da como resultado una carga negativa: $3(+) + 4(-) = 1(-)$ (Figura 1.13).

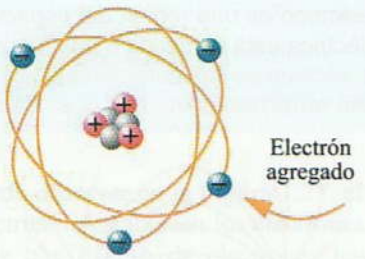


Figura 1.13. **Átomo con carga negativa.**

1.4 Electricidad estática

Al frotar determinados materiales aislantes, éstos pierden o ganan electrones, lo que origina cargas eléctricas estáticas en dichos materiales. Este tipo de electricidad es el que se da, por ejemplo, en la Actividad experimental 1.1, realizada anteriormente.

Al frotar el bolígrafo de plástico con el paño, se transfieren electrones de un elemento a otro, quedando el bolígrafo cargado eléctricamente. Cuando acercamos el bolígrafo, cargado con electricidad estática, éste atrae a los papelitos, como es propio de los cuerpos electrizados.

El tipo de carga (positiva o negativa) con la que se electrizan los materiales después de haber sido frotados depende de los materiales que se empleen en el proceso. Así, por ejemplo, si se frota una barra de vidrio con un paño de lana, los electrones se transfieren del vidrio hacia el paño, quedando electrizado el primero con carga positiva (Figura 1.14).

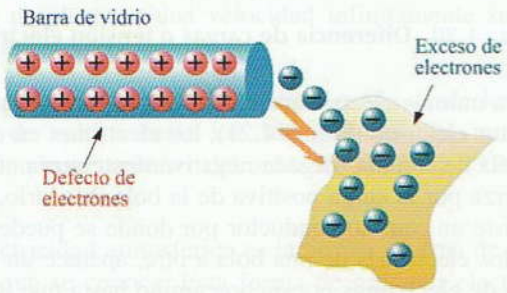


Figura 1.14. **Al frotar, el vidrio se electriza con carga positiva.**

Por otro lado, si lo que frotamos es una barra de ebonita con una piel de animal, los electrones son transferidos de la piel a la ebonita, quedando esta última cargada negativamente (Figura 1.15).

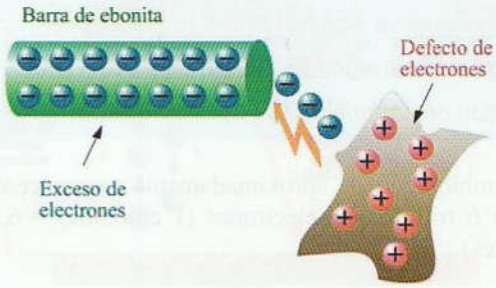


Figura 1.15. **Al frotar la ebonita se electriza con carga negativa.**

¿Qué ocurre si después de frotar dos barras de vidrio se acercan? (Figura 1.16).

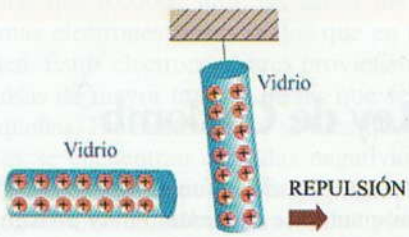


Figura 1.16. **Dos barras cargadas positivamente se repelen.**

¿Qué ocurre si después de frotar una barra de vidrio y una de ebonita las barras se acercan? (Figura 1.17).

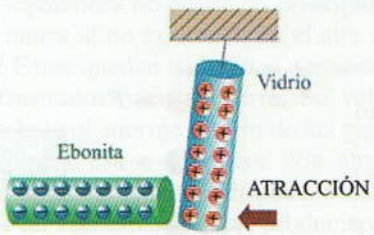


Figura 1.17. **Dos barras cargadas con diferente carga se atraen.**

El causante, en todo momento, de la electrización de los cuerpos es el electrón, ya que posee carga y movilidad para poder desplazarse por los materiales. A partir de estos dos conceptos, es posible que exista la electricidad.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1.5 Carga eléctrica

Se conoce como carga eléctrica de un cuerpo al exceso o defecto de electrones que éste posee:

- *Carga negativa significa exceso de electrones.*
- *Carga positiva significa defecto de electrones.*

La unidad de carga eléctrica es el **culombio**.

Un culombio equivale aproximadamente a un exceso o defecto de 6 trillones de electrones (1 culombio = $6{,}3 \cdot 10^{18}$ electrones).

Actividad resuelta 1.1

Determina la carga eléctrica que tiene una barra de ebonita, si una vez frotada posee un exceso de $25{,}2 \cdot 10^{18}$ electrones:

$$Q = \frac{25{,}2 \cdot 10^{18}}{6{,}3 \cdot 10^{18}} = 4 \text{ culombios de carga negativa}$$

1.5.1. Ley de Coulomb

Coulomb consiguió medir la fuerza que desarrollan las cargas eléctricas cuando se encuentran muy próximas. De esta forma, dedujo que:

Dos cargas eléctricas puntuales Q_1 y Q_2 ejercen una sobre otra fuerzas de atracción y repulsión, que son directamente proporcionales al producto de dichas cargas, e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa (Figura 1.18).

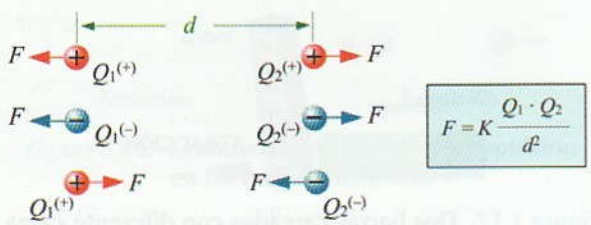


Figura 1.18. Fuerzas de atracción y repulsión entre cargas eléctricas.

Si expresamos la fuerza (F) en newtons, las cargas Q_1 y Q_2 en culombios y la distancia (d) en metros, la constante de proporcionalidad (K) para el vacío o el aire será:

$$K = 8{,}987 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

1.5.2. Campo eléctrico

Cuando frotamos el bolígrafo y éste atrae los papelillos, es debido a que éste ha desarrollado un campo de fuerzas eléctricas. Estamos hablando del campo eléctrico. Así, se puede decir que:

Un campo eléctrico es una región del espacio en el que una carga eléctrica está sometida a una fuerza de carácter eléctrico.

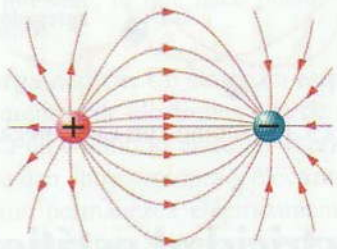


Figura 1.19. Líneas de fuerza del campo eléctrico formado por dos cargas eléctricas de diferente signo.

1.6 Movimiento de electrones

Supongamos que cargamos eléctricamente, por frotamiento, una bola de vidrio y otra de ebonita y las disponemos tal como se indica en la Figura 1.20. Entre ellas aparece una diferencia de carga eléctrica.

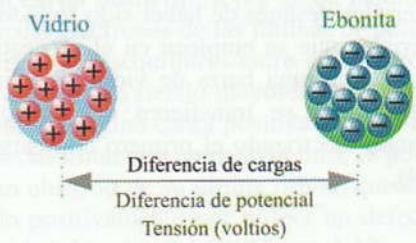


Figura 1.20. Diferencia de cargas o tensión eléctrica.

Si ahora unimos eléctricamente las dos bolas mediante un conductor eléctrico (Figura 1.21), los electrones en exceso de la bola de ebonita cargada negativamente serán atraídos con fuerza por la carga positiva de la bola de vidrio. Dado que existe un camino conductor por donde se pueden desplazar los electrones de una bola a otra, aparece un **movimiento de electrones** por dicho camino hasta que las cargas queden compensadas, es decir, hasta que la **diferencia de cargas** deja de existir.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

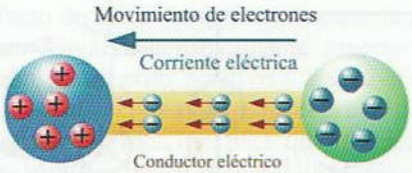


Figura 1.21. **Corriente eléctrica.**

Al movimiento de electrones que se establece por el conductor eléctrico se le denomina **corriente eléctrica**.

Como se puede observar en la Figura 1.21, el sentido de la corriente eléctrica lo establecen los electrones, es decir, del cuerpo donde hay exceso de electrones hasta el cuerpo donde hay defecto de ellos (del negativo al positivo).

A la diferencia de cargas que se establece entre los dos cuerpos cargados eléctricamente, y que es la causante del movimiento de electrones, se la conoce por otro nombre: **tensión o diferencia de potencial**.

1.6.1. Electricidad atmosférica

La palabra tormenta es sinónima de tempestad; es decir, una perturbación atmosférica muy violenta que va acompañada de fenómenos eléctricos. Es un gran espectáculo de la Naturaleza, pues en él se manifiestan la lluvia, el granizo, el viento, los rayos, los relámpagos y los truenos.

El rayo es una descarga eléctrica que salta de una nube a otra, o a tierra, cuando ambas están cargadas de electricidad de diferente signo y hay suficiente proximidad para provocar la chispa. El relámpago es el resplandor que esa misma descarga produce, y el trueno el ruido o estampido que acompaña a las chispas, y que se percibe en último lugar porque, como se sabe, el sonido se transmite a una velocidad de 331,8 m/s, mientras que la electricidad y la luz se desplazan a una velocidad infinitamente superior: 300.000 km/s.

La tensión de descarga de un rayo oscila desde los 2 millones de voltios hasta los 100 millones. La intensidad de la corriente suele ser del orden de 10.000 a 20.000 amperios.

La electricidad atmosférica es la primera forma de electricidad que se conoce. Esta forma de producir electricidad no es de utilidad, en ningún caso, y más bien trae desgracias que otra cosa.

Las tormentas dependen del Sol. Cuanto más calor hace, tanto más fácilmente se forman, por regla general (véase Figura 1.22).

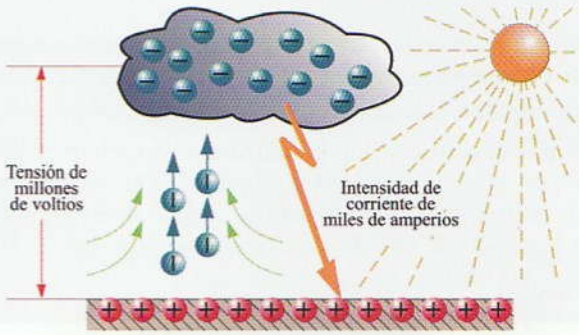


Figura 1.22. **El rayo en la tormenta.**

El Sol calienta el aire en la proximidad de la Tierra; el aire caliente tiende a elevarse arrancando consigo en su rápida ascensión diminutas partículas de agua. Cuando las gotitas de agua se subdividen en partículas, de las que algunas son más pequeñas que 0,00001 mm, las partes más diminutas contienen más electrones libres de los que en realidad les corresponden. Estos electrones libres provienen de las partículas acuosas de mayor tamaño de las que se desgajaron las más pequeñas. En electrotecnia se dice que las partículas pequeñas se encuentran cargadas negativamente y las mayores poseen cargas positivas. Estas partículas acuosas, cargadas negativamente, suben arrastradas por el torbellino. A medida que las partículas se elevan, la temperatura desciende. El descenso es aproximadamente de medio grado por cada cien metros. Debido a esto las partículas gaseosas se condensan, formando nubes. Sobre nosotros flota la nube tempestuosa y entre ella y la tierra una tensión de millones de voltios queriendo reconstruir el equilibrio eléctrico, a lo que se opone un buen aislante, el aire, contra cuya acción separadora no puede en principio la tormenta. Y no podría nunca si no existieran en el aire algunos electrones libres. Estos quedan sometidos a tensiones gigantescas y son arrastrados hacia la tierra. Su velocidad crece cada vez más bajo el enorme influjo de las gigantescas tensiones. Al golpear estos electrones con átomos neutros, éstos pierden algunos de sus electrones, y éstos, a su vez, vuelven a chocar con otros átomos, produciéndose siempre la liberación de nuevos electrones. En poquísimo tiempo aumenta en millones el número de elementos conductores de la electricidad. La elevada tensión se ha creado un camino y la nube descarga una gran cantidad de electrones hacia la tierra. La intensidad de la corriente es tan grande que, al atravesar el aire, éste llega a ponerse al rojo blanco, la temperatura se eleva a 20.000 grados y se produce una explosión: la nube ha descargado en forma de rayo su carga eléctrica.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1.7 El circuito eléctrico

Actividad experimental 1.2

Consigue una pila y una lámpara de linterna y conéctalas con unos conductores de cobre tal como se indica en la Figura 1.23(a).

Podrás comprobar que la lámpara se enciende cuando se ponen en contacto los terminales de la lámpara con los bornes de la pila y se apaga cuando interrumpimos la conexión de uno de los conductores con la pila [Figura 1.23(b)].

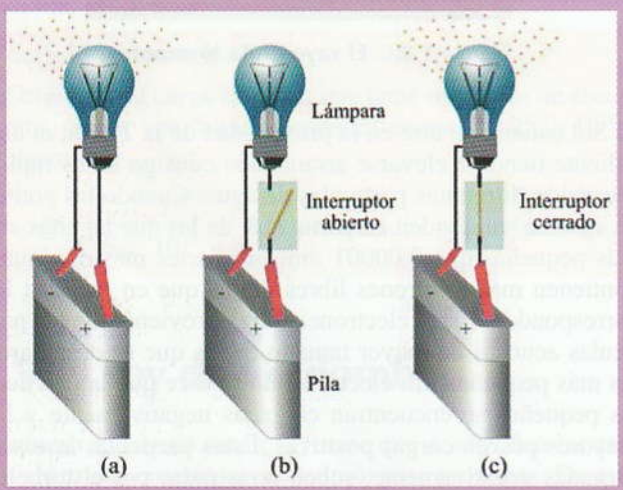


Figura 1.23. Circuito eléctrico simple.

La pila contiene energía eléctrica. Al conectarla mediante los conductores a la lámpara, por éstos fluye una corriente eléctrica hacia la misma, que hace que ésta transforme la energía eléctrica en luminosa.

Ahora conecta un interruptor, tal como se muestra en la Figura 1.23(c), y a continuación ábrelo y ciérralo.

Podrás comprobar que la lámpara sólo se enciende cuando el interruptor pone en contacto el borne de la pila con el terminal de dicha lámpara. De esta manera, podemos encender y apagar la lámpara a voluntad.

Existe otra forma más fácil de hacer un dibujo eléctrico, tal como se muestra en la Figura 1.24. Se le denomina esquema eléctrico, y en él se representan sus elementos (pila, conductores y lámpara) mediante símbolos normalizados.

En la Actividad experimental 1.2 hemos construido un sencillo circuito eléctrico (Figura 1.25); vamos a estudiar ahora las magnitudes básicas y los fenómenos que se producen en él.

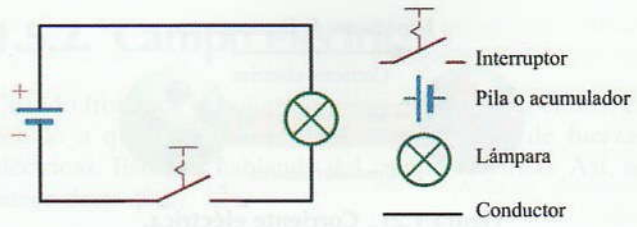


Figura 1.24. Esquema eléctrico.

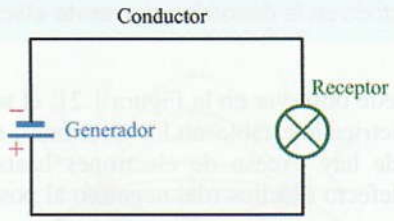


Figura 1.25. Circuito eléctrico.

Las condiciones que se han de dar para que se forme un circuito eléctrico básico como el de la Figura 1.24, son:

- Un GENERADOR, que se encarga de generar una diferencia de cargas o tensión entre sus dos polos. En la Actividad experimental 1.2 utilizamos como tal una pila de 4,5 voltios de tensión.
- Un CONDUCTOR, que permite que fluyan los electrones de una parte a otra del circuito. En la Actividad experimental 1.2 empleamos conductores de cobre.
- Un RECEPTOR o aparato eléctrico, que aprovechando el movimiento de electrones consigue transformar la energía eléctrica en energía calorífica, luminosa, motriz, etc. En la Actividad experimental 1.2 usamos una lámpara de linterna.

Estudiaremos ahora detenidamente cómo fluye la corriente eléctrica por el circuito (Figura 1.26). El generador (en este caso una pila), a costa de consumir algún tipo de energía, separa las cargas en el interior del generador gracias a la fuerza electromotriz (f.e.m.), tomando electrones de una placa y depositándolos en otra. La placa donde son arrancados los electrones queda, por tanto, cargada positiva-

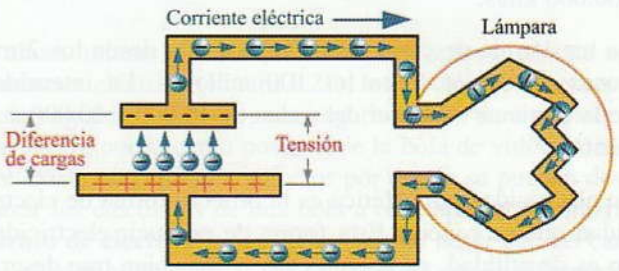


Figura 1.26. Movimiento de electrones con un circuito.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

mente (defecto de electrones), mientras que la placa donde se depositan se carga negativamente (exceso de electrones), formándose el polo positivo y negativo del generador. Ahora, entre dichos polos aparece una diferencia de cargas o tensión eléctrica que hace que los electrones sean fuertemente atraídos por el polo positivo. A través del generador, los electrones no pueden fluir de un polo a otro, dado que la fuerza electromotriz tiene un valor un poco mayor que la fuerza provocada por la tensión. El único camino posible por donde los electrones pueden moverse desde el polo negativo es por el conductor, atravesando el receptor hasta llegar al polo positivo. La f.e.m. del generador se encarga de seguir separando las cargas continuamente, y la tensión en bornes de la pila de reponerlos a través del receptor en un movimiento continuo, completándose así lo que se conoce por circuito eléctrico.

Una vez que ya sabemos lo que es un circuito eléctrico, vamos a pasar a estudiar detenidamente a lo largo de este estudio sobre Electrotecnia, las partes que forman dicho circuito. Comenzaremos con las formas de producir electricidad, es decir los diferentes tipos de generadores, para seguir con el estudio de las magnitudes más importantes de un circuito y sus relaciones, así como el de los conductores y aislantes, elementos que producen calor, propiedades químicas y magnéticas de la electricidad, pilas, acumuladores, lámparas y motores.

1.8 Formas de producir electricidad

El encargado de producir la electricidad es el generador, que aprovechando algún fenómeno físico es capaz de desarrollar una determinada fuerza electromotriz que separa las cargas entre sus polos y crea una diferencia de potencial o tensión.

Existen varias formas de producir electricidad, de las cuales se construyen los diferentes tipos de generadores.

1.8.1. Producción de electricidad por frotamiento

Esta forma de producir electricidad es ya conocida por todos nosotros. ¿Has sentido alguna vez un calambrazo y oído un chisporroteo al quitarte un jersey o al mover una alfombra?

Fíjate bien en la siguiente explicación: Al andar sobre una alfombra, se produce un frotamiento entre ésta y los pies, lo cual genera una acumulación de cargas eléctricas en la superficie de ésta. Esta carga eléctrica puede originar tensiones del orden de algunos miles de voltios y se la denomina «carga electrostática». Esta acumulación de cargas puede ser peligrosa, ya que se pueden descargar, en cualquier momento, a través de las personas y ocasionar accidentes. A continuación se exponen dos ejemplos:

- ¿Por qué razón crees que los coches, a veces, llevan colocada una cinta antimareo en la parte trasera de la carrocería, haciendo contacto entre ésta y la tierra? ¿Tendrá algo que ver esto con el peligro de las cargas estáticas?

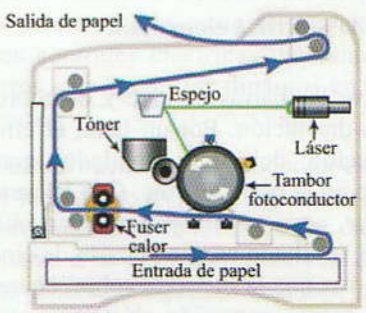
Figura 1.27. **Carga electrostática acumulada en un automóvil.**

- Dentro de las instalaciones sanitarias, los quirófanos deben cumplir unas rigurosas normas de seguridad, contempladas en el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), consistentes en proteger a todos los equipos (aparatos de electromedicina, mesa de quirófano, etc.) de la acumulación de cargas eléctricas estáticas. Una de las protecciones consiste en conectar todos los equipos a tierra.

¿Qué razones crees que han llevado a tomar estas medidas de seguridad tan rigurosas en los quirófanos?

Aprovechando las fuerzas que aparecen entre las cargas eléctricas, se pueden construir dispositivos que aprovechen estas propiedades, como por ejemplo:

- Las impresoras láser y las fotocopiadoras (Figura 1.28).
- Máquinas de pintura por rociado.
- Recogida de polvo mediante precipitadores electrostáticos.



Se aplica un láser a un tambor fotoconductor según sea el archivo a imprimir. Mediante este proceso, se crea una imagen en el tambor con una carga eléctrica estática que atrae a las partículas del tóner al tambor, que posteriormente se transfieren a la página impresa.

Figura 1.28. **Fundamento de la impresión láser.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1.8.2. Producción de electricidad por reacción química

Las pilas y acumuladores son generadores que, aprovechando la energía que se desarrolla en determinadas reacciones químicas, producen electricidad (Figura 1.29).

Acumulador Pila

Figura 1.29. Pilas y acumuladores.

Así, por ejemplo, podemos fabricar una pila sencilla con los elementos de la Figura 1.30. En este caso, introducimos una barra de cobre (Cu) y una barra de cinc (Zn) en una disolución de agua (H_2O) con unas gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Los terminales de ambas barras se conectan a un voltímetro.

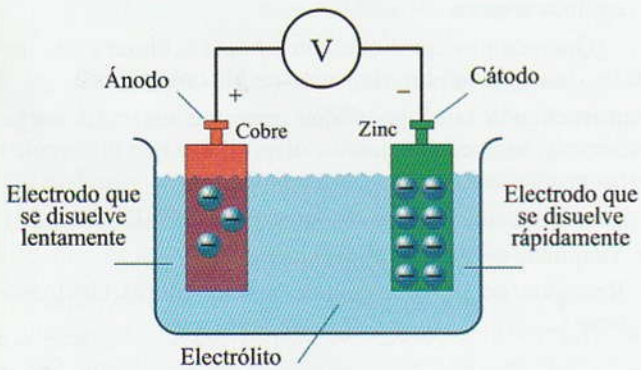


Figura 1.30. Pila eléctrica elemental.

El ácido sulfúrico disuelve las barras de cinc y de cobre, pasando sus átomos a la disolución. Por un lado, el cinc cede átomos a la disolución, dejando acumulados gran cantidad de sus electrones en la barra de cinc. Con la barra de cobre pasa algo similar, pero en ella se acumulan muchos menos electrones. El resultado es que la barra de cinc se hace mucho más negativa que la barra de cobre, apareciendo una diferencia de cargas, o tensión eléctrica, entre las dos barras.

Mientras exista material activo en las barras para disolverse, esta pila elemental producirá fuerza electromotriz, pero la pila deja de ser útil cuando se agotan dichos materiales.

Sin embargo, los acumuladores eléctricos, como los que constituyen las baterías de los automóviles, se pueden recargar una vez agotados. Para ello basta con hacerles pasar una corriente eléctrica cuando están descargados. Esto se consigue conectándolos a una fuente de energía eléctrica.

Las aplicaciones prácticas de las pilas y acumuladores son ya bastante conocidas por todos nosotros; destacamos algunas de ellas: alimentación de aparatos portátiles, vehículos eléctricos, automóviles, instalaciones fotovoltaicas de energía solar, almacenamiento de energía eléctrica de emergencia, etc.

1.8.3. Producción de electricidad por presión

Existen ciertos materiales, como los cristales de cuarzo, que, cuando son golpeados o presionados entre sus caras, aparece una tensión eléctrica (Figura 1.31).

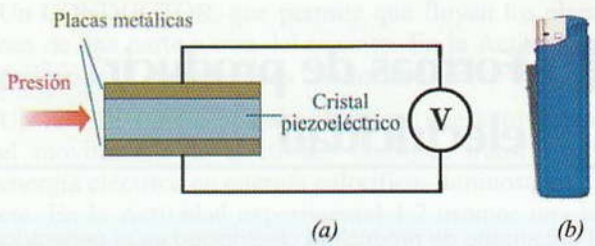


Figura 1.31. (a) Al ser presionados ciertos materiales se produce electricidad. (b) Mechero piezoeléctrico.

De alguna manera lo que ocurre es que, al presionar el cristal, los electrones salen desplazados de una de las caras a la otra, lo que origina una diferencia de cargas. Esta propiedad se denomina *piezoelectricidad*.

Dado que la diferencia de potencial que aparece entre las caras de estos materiales es proporcional a la presión ejercida, con ellos pueden construirse agujas para tocadiscos, micrófonos piezoeléctricos, etc.

Ciertos encendedores de cocina aprovechan el efecto piezoeléctrico para su funcionamiento. En estos casos, un percutor golpea con fuerza un cristal, lo que provoca una fuerte diferencia de potencial entre sus caras (del orden de algunos miles de voltios). Al aplicar esta fuerte tensión entre dos electrodos, surge una chispa eléctrica entre ellos.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1.8.4. Producción de electricidad por acción de la luz

Mediante las células fotovoltaicas es posible transformar directamente la energía luminosa en energía eléctrica.

La célula fotovoltaica se construye con materiales semiconductores sensibles a la luz. Al incidir energía luminosa en estos semiconductores, se produce el desprendimiento de electrones en las últimas órbitas de sus átomos, provocando una diferencia de cargas entre sus caras (Figura 1.32).

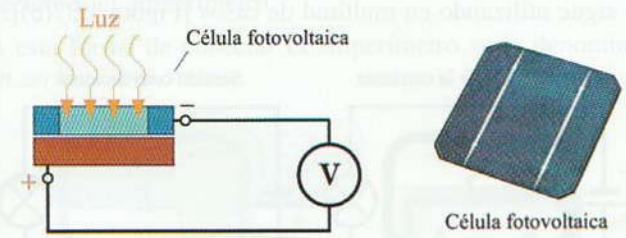


Figura 1.32. Las células fotovoltaicas transforman la luz en electricidad.

Esta forma de producir electricidad se aplica a generadores de energía eléctrica para satélites espaciales y para suministro autónomo de energía en instalaciones apartadas de la red eléctrica.

1.8.5. Producción de electricidad por acción del calor

Algunos cuerpos poseen propiedades termoeléctricas, con los cuales se pueden construir pares termoeléctricos. Éstos constan de dos metales distintos y unidos, que, al ser calentados, manifiestan una diferencia de potencial entre sus extremos (Figura 1.33).

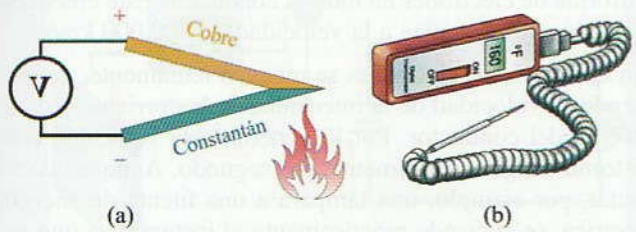


Figura 1.33. (a) Par termoeléctrico. (b) Termómetro con termopar.

Este fenómeno se debe a que uno de los metales desprende más electrones que el otro, por efecto del calor, generándose una pequeña diferencia de cargas entre sus extremos que es proporcional a la temperatura de la unión.

La energía eléctrica que se produce mediante este sistema es muy pequeña. Mediante este fenómeno se fabrican termopares para la construcción de **termómetros** (especialmente para medir temperaturas en hornos).

Este efecto se puede revertir si aplicamos una tensión eléctrica a dos termopares. Se conoce como efecto Peltier (Figura 1.34). Al hacer circular una corriente continua por los dos termopares, en uno de los puntos de unión aparece un aumento de temperatura, mientras que en el otro aparece una disminución de la misma. Aprovechando este fenómeno es posible construir pequeños elementos de refrigeración, como por ejemplo, neveras portátiles para conectar al automóvil, refrigeración de equipos electrónicos (ordenadores), etc.

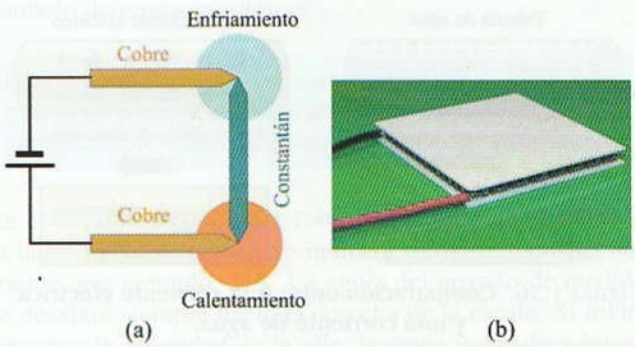


Figura 1.34. (a) Efecto Peltier. (b) Célula Peltier.

1.8.6. Producción de electricidad por acción magnética

Esta forma de producir electricidad ya es conocida por todos nosotros. Se basa en el principio de Faraday, y es de esta forma como se produce la energía en las grandes centrales eléctricas mediante los alternadores o, en otros casos, con las dinamos en forma de corriente continua.

Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico) en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor. En un generador eléctrico se hacen mover bobinas en sentido giratorio en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Figura 1.35).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

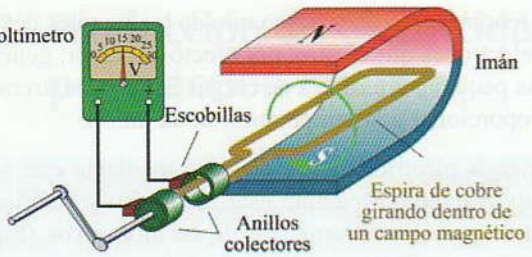


Figura 1.35. Al mover conductores dentro de un campo magnético se produce electricidad.

1.9 Intensidad de la corriente eléctrica

La intensidad de la corriente eléctrica es la cantidad de electricidad que recorre un circuito en la unidad de tiempo (Figura 1.36).

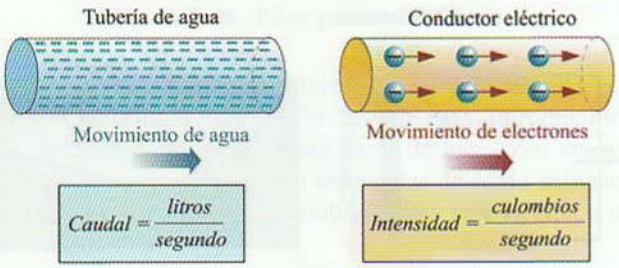


Figura 1.36. Comparación entre una corriente eléctrica y una corriente de agua.

Esta magnitud es comparable al caudal de agua que fluye por una tubería.

La unidad de medida de la intensidad (símbolo *I*) de corriente eléctrica es el **amperio (A)**. De esta manera, cuando en un circuito se mueve una carga de un culombio en un tiempo de un segundo, se dice que la corriente tiene una intensidad de un amperio.

$$I = \frac{Q}{t} \qquad 1 \text{ amperio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ segundo}}$$

Actividad resuelta 1.2

Determina la intensidad de corriente que se ha establecido por un conductor eléctrico, si por él ha fluido una carga de 4 culombios en un tiempo de 2 segundos.

Solución: $I = \frac{Q}{t} = \frac{4 \text{ C}}{2 \text{ s}} = 2 \text{ A}$

1.10 Sentido real y convencional de la corriente

En un circuito, el sentido de la corriente eléctrica lo determina el movimiento de electrones, tal como se indica en la Figura 1.37(a). Sin embargo, los antiguos científicos creían que la corriente eléctrica fluía del cuerpo cargado positivamente al cargado negativamente. Este sentido, denominado *convencional* es el que más se ha utilizado hasta ahora, dado que en él se fundamentan muchas reglas de electromagnetismo y de otras materias afines. Incluso, hoy en día, se sigue utilizando en multitud de casos [Figura 1.37(b)].

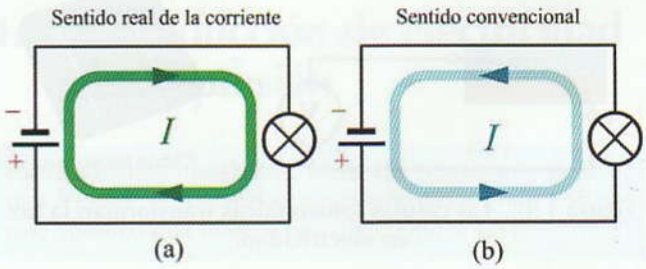


Figura 1.37. Sentido real y convencional de la corriente eléctrica.

1.11 Movimiento de electrones en un circuito

En un circuito eléctrico, como el de la Figura 1.37(a), la intensidad de la corriente en cualquier punto del mismo es igual. Es decir, existe el mismo flujo de electrones a la salida del generador que a su entrada. Hay que pensar que, al igual que en una tubería que está llena de agua a presión, un conductor eléctrico está también lleno de electrones libres dispuestos a moverse. En cuanto algunos se mueven, empujan al resto, estableciéndose un efecto de traslación uniforme de electrones en todo el conductor. Este efecto de traslación se comunica a la velocidad de 300.000 km/s.

Sin embargo, los electrones se mueven lentamente, dependiendo su velocidad de la intensidad de la corriente y de la sección del conductor. Por lo general, esta velocidad está en torno a algunos milímetros por segundo. Aunque, al conectar, por ejemplo, una lámpara a una fuente de energía eléctrica, se enciende prácticamente al instante, ya que todos los electrones libres del conductor entran en movimiento a la vez.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

1.12 Medida de la intensidad de la corriente eléctrica

Para medir la intensidad de la corriente eléctrica utilizamos un aparato de medida llamado amperímetro. Para medir el caudal de agua intercalamos en la tubería un contador. De la misma manera, para medir la cantidad de cargas que se mueven por un circuito en la unidad de tiempo, el amperímetro deberá estar intercalado en el conductor (Figura 1.38). Dado que la intensidad de la corriente es igual en todos los puntos del circuito, es indiferente dónde conectemos el amperímetro.

A esta forma de conectar el amperímetro se la denomina *en serie*.

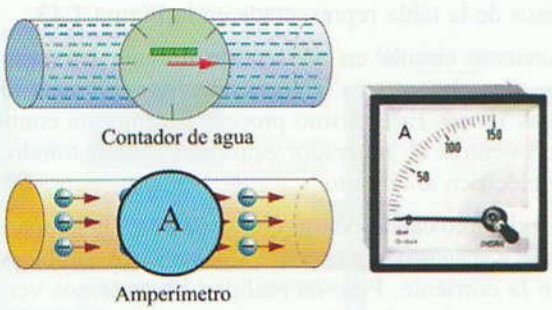


Figura 1.38. El amperímetro se intercala en serie con el circuito.

Actividad experimental 1.3

Toma un amperímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la intensidad que fluye por una lámpara al ser conectada a una pila (Figura 1.39). Al hacer el montaje, ten cuidado de que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud a medir, ya que, de otra manera, podríamos estropear el instrumento medidor.

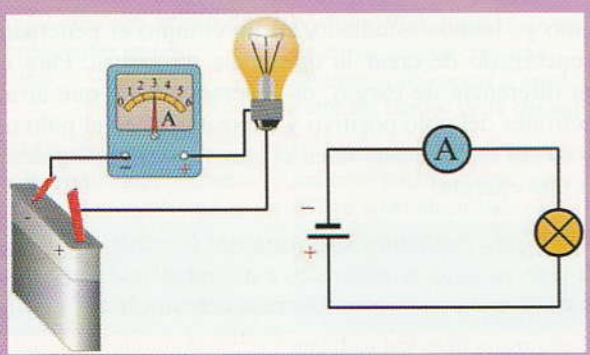


Figura 1.39. Medida de intensidad con el amperímetro.

Gracias a la Actividad experimental 1.3, habrás podido observar que el amperio no es una unidad de medida adecuada, ya que resulta excesivamente grande para expresar el resultado. En estos casos se utilizan los submúltiplos:

1 mA (miliamperio) = 1/1.000 = 0,001 = 10^{-3} A

1 μA (microamperio) = 1/1.000.000 = 0,000001 = 10^{-6} A

Así, por ejemplo:

- Peligro de muerte por electrocución: 100 mA
- Umbral de sensación del cuerpo humano: 3.000 μA

1.13 Corriente continua (C.C.)

Corriente continua es la que proporcionan las baterías de acumuladores, pilas, dinamos y células fotovoltaicas. Su símbolo de representación es –.

> Una corriente continua se caracteriza porque los electrones libres siempre se mueven en el mismo sentido por el conductor con una intensidad constante.

En el circuito de la Figura 1.40, la pila proporciona C.C. a la lámpara. El amperímetro indicará siempre la misma corriente, por ejemplo, 1 A. La aguja del aparato de medida se desviará siempre hacia la derecha de la escala. Si invirtiésemos la polaridad de la pila, la aguja indicadora intentaría desviarse hacia la izquierda.

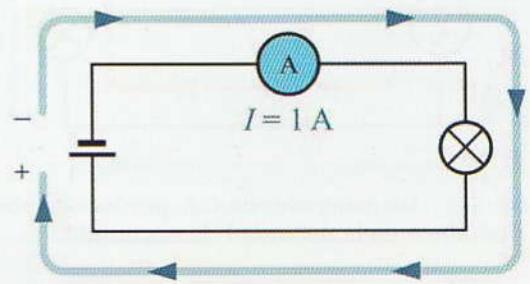


Figura 1.40. Un generador de C.C. mantiene invariable la polaridad de sus terminales.

En el gráfico de la Figura 1.41 se ha representado la C.C. de 1 A. Observa que este valor se mantiene invariable con el paso del tiempo.

Los usos que se hacen de la C.C. son muy variados: baños electrolíticos, alimentación de aparatos electrónicos, tracción eléctrica (coches, tranvías, etc.) y otros muchos más.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Punto	I	t
A	1 A	1 s
B	1 A	2 s
C	1 A	3 s
D	...	...

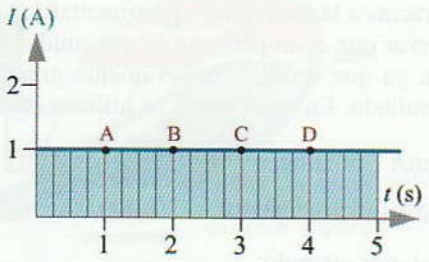


Figura 1.41. **Representación gráfica de una C.C.**

1.14 Corriente alterna (C.A.)

La corriente alterna es la que producen los alternadores en las centrales eléctricas. Es la forma más común de transportar la energía eléctrica y de consumirla en nuestros hogares y en la industria en general. Su símbolo es ~.

Una corriente alterna se caracteriza porque el flujo de electrones se mueve por el conductor en un sentido y en otro, y además, el valor de la corriente eléctrica es variable.

Se podría decir que, en este caso, el generador produce periódicamente cambios en la polaridad de sus terminales de salida (Figura 1.42).

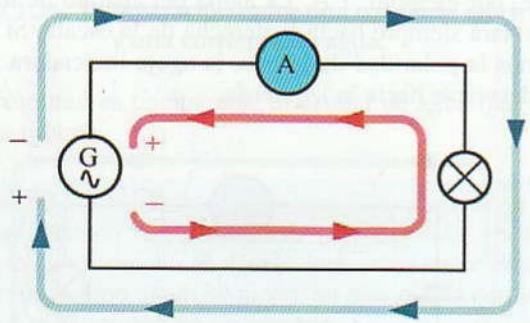


Figura 1.42. **Un generador de C.A. produce cambios periódicos en la polaridad de sus terminales.**

Para entender esto mejor, observa el gráfico de la Figura 1.43 donde está representada una C.A. industrial (como la que producen las centrales eléctricas y que llega hasta nuestras casas). El eje de tiempos lo hemos puesto en milisegundos, ya que los cambios de corriente son muy rápidos (para una C.A. industrial, la señal representada en la Figura 1.43 se repite 50 veces en un segundo).

Supongamos que conectamos un amperímetro de C.C. en un circuito alimentado por un generador de C.A. Si la aguja del aparato pudiera desviarse en ambos sentidos y seguir

Punto	I (A)	t (ms)
A	5,9	2
B	10	5
C	3	9
D	0	10
E	−5,9	12
F	−10	15
G	0	20

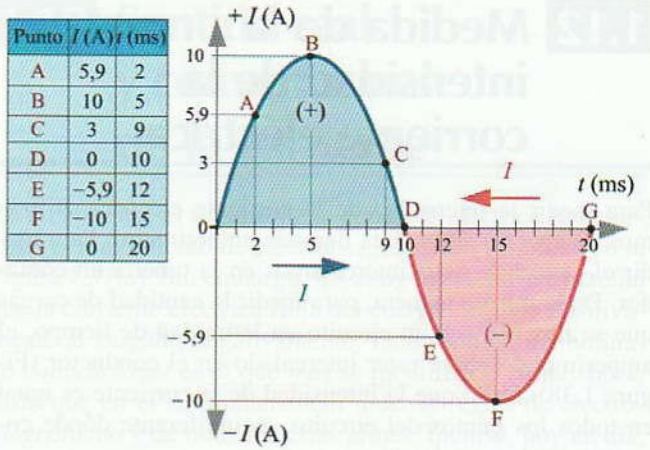


Figura 1.43. **Representación gráfica de una C.A.**

las rápidas variaciones de la corriente, se nos presentarían los casos de la tabla representada en la Figura 1.43

La corriente circula en un sentido durante los primeros 10 ms, y en el contrario (valores negativos) durante los siguientes 10 ms. Este mismo proceso se repetiría continuamente mientras el generador estuviese suministrando corriente eléctrica al circuito.

En un principio cabría pensar que veríamos a la lámpara encenderse y apagarse rápidamente, siguiendo los cambios rápidos de la corriente. Pero en realidad no podemos ver este fenómeno, ya que el ojo humano no es capaz de percibirlo.

Dado que la corriente alterna es más fácil de producir, y que posee una serie de características que hacen más fácil su transporte, su campo de aplicación es muy amplio.

Dada la importancia que posee la C.A. nos dedicaremos a su estudio en profundidad en la Unidad didáctica 12.

1.15 Tensión eléctrica y fuerza electromotriz

Como ya hemos estudiado, en un circuito el generador es el encargado de crear la diferencia de cargas. Para crear esta diferencia de cargas, el generador tiene que arrancar electrones del polo positivo y depositarlos en el polo negativo. Para realizar esta tarea el generador necesita desarrollar una energía:

A la fuerza necesaria para trasladar los electrones desde el polo positivo al negativo, y así crear la diferencia de cargas, se la denomina **fuerza electromotriz (f.e.m.)**.

Es la f.e.m. la que permite la circulación de electrones; el propio término lo indica: fuerza electromotriz, que mueve

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

los electrones. La f.e.m. se mide en voltios y en realidad es la tensión interna o de vacío que posee el generador.

A la diferencia de cargas se la llama de otra forma: diferencia de potencial o tensión eléctrica (símbolo *U* o *V*), y su unidad de medida es el voltio (V).

En este texto utilizaremos el símbolo V para referirnos a la tensión, ya que esta es la nomenclatura que se utiliza en las hojas de características de los semiconductores.

1 milivoltio = 1 mV = 0,001 V

1 kilovoltio = 1 kV = 1.000 V

Para comprender aún mejor todas las magnitudes que aparecen en un circuito eléctrico, vamos a hacer una comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico (Figura 1.44 y Tabla 1.1).

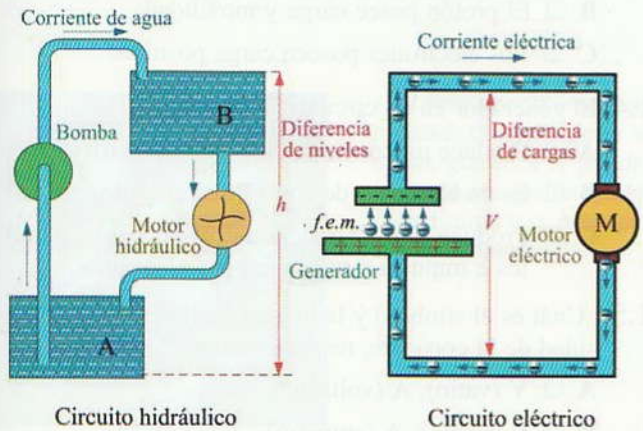


Figura 1.44. Comparación gráfica entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico.

Tabla 1.1. Comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico.

Circuito hidráulico	Circuito eléctrico
La bomba de agua eleva el agua del depósito A hasta el B, lo que crea una diferencia de alturas entre ambos depósitos.	El generador eléctrico arranca los electrones de la placa positiva y los deposita en la negativa, lo que crea una diferencia de cargas o tensión entre los bornes de la lámpara.
El depósito B, al estar más alto que el A, adquiere una energía potencial, pudiendo luego el agua descender hacia A y mover así el motor hidráulico.	El defecto de cargas negativas del polo positivo atrae con fuerza a los electrones en exceso del polo negativo, a través del circuito, produciéndose un movimiento de electrones, o corriente eléctrica por el filamento de la lámpara, que la hace lucir.

1.16 Medida de la tensión

Para medir la tensión eléctrica se precisa un aparato de medida que sea capaz de captar el desnivel eléctrico o diferencia de cargas entre un punto y otro.

El voltímetro se conecta siempre entre los dos puntos entre los que se quiere determinar la tensión.

Esta forma de conectar el voltímetro se denomina «conexión en paralelo o derivación» (Figura 1.45).

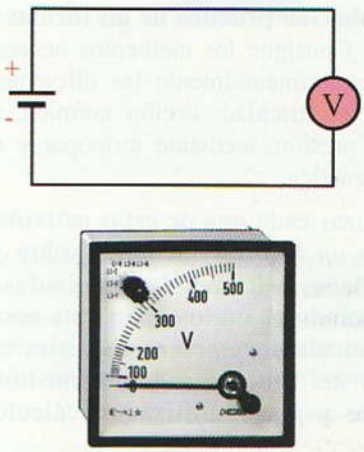


Figura 1.45. El voltímetro se conecta en paralelo.

Actividad experimental 1.4

Toma un voltímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la tensión que aparece entre los polos de una pila (Figura 1.46). De la misma manera que se hizo al medir la intensidad de la corriente, al hacer las conexiones cuida que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud que vamos a medir.

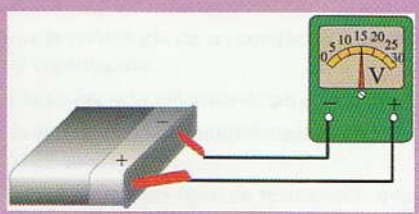


Figura 1.46.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

1.1 Comprobación práctica de los efectos de la electricidad. Consigue los elementos necesarios y comprueba experimentalmente los efectos de la corriente eléctrica: térmico, luminoso, químico y magnético.

1.2 Comprobación práctica de las formas de producir energía. Consigue los elementos necesarios y comprueba experimentalmente las diferentes formas de producir electricidad: acción química, acción de la luz, por presión, mediante termopar y mediante acción magnética.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

AUTOEVALUACIÓN

1.1 ¿Qué ocurre si se acercan un elemento de ebonita y otro de vidrio una vez frotados?

A ❑ Se repelen.

B ❑ Se atraen.

C ❑ Se cargan de electricidad.

1.2 ¿Qué ocurre cuando se conectan por un conductor dos cuerpos cargados de electricidad de diferente polaridad?

A ❑ Se atraen.

B ❑ Se repelen.

C ❑ Aparece un flujo de electrones por el conductor hasta que se descargan.

1.3 La electricidad existe gracias a que:

A ❑ El electrón posee carga y movilidad.

B ❑ El protón posee carga y movilidad.

C ❑ Los electrones poseen carga positiva.

1.4 El generador en un circuito eléctrico:

A ❑ Produce un consumo de energía eléctrica.

B ❑ Es un elemento de control del circuito.

C ❑ Produce una diferencia de cargas entre sus polos e impulsa a moverse a los electrones.

1.5 ¿Cuál es el símbolo y la unidad de la tensión e intensidad de la corriente, respectivamente?

A ❑ V (vatio), A (voltio).

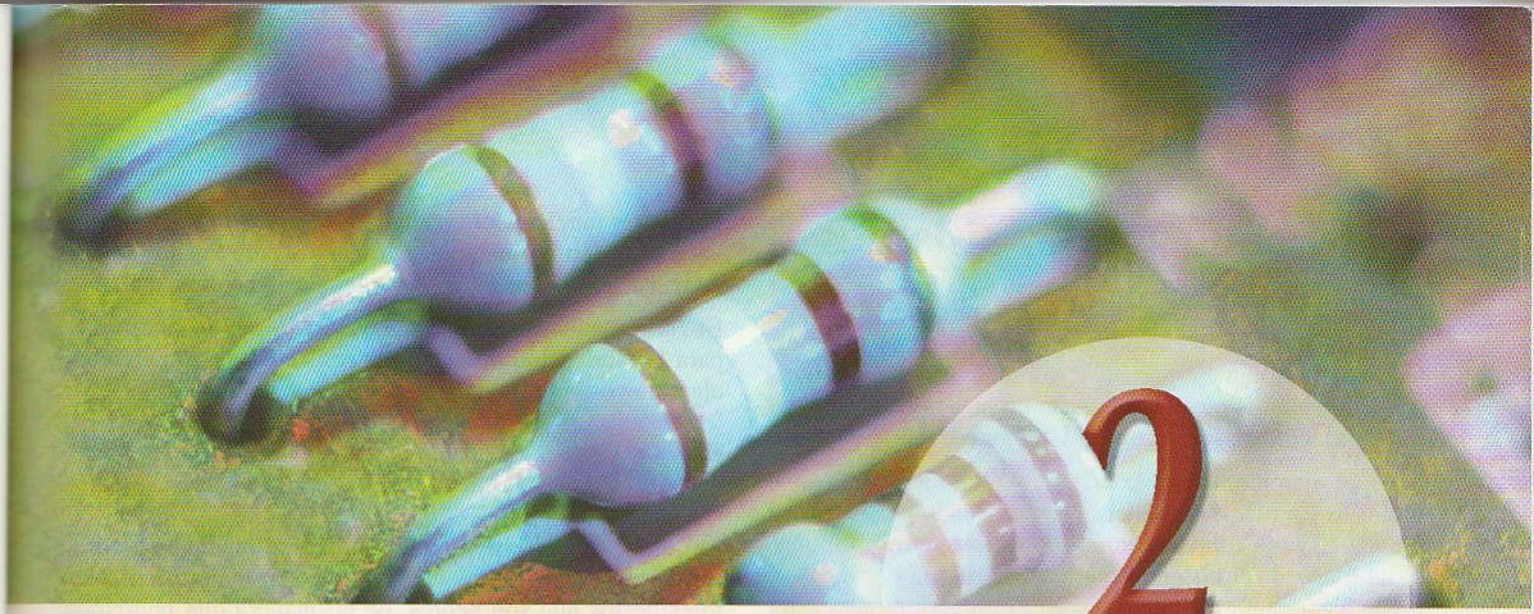
B ❑ V (voltio), A (amperio).

C ❑ V (vatio), mA (miliamperio).

1.6 Calcula la intensidad de corriente que ha fluido por un conductor si, en 2 minutos y 20 segundos, se han trasladado $18{,}9 \cdot 10^{18}$ electrones.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



2

Resistencia, potencia y energía eléctrica

La resistencia eléctrica es una característica asociada a los materiales de uso común en electricidad. Conociendo el valor de la resistencia de un conductor o aislante podremos determinar, gracias a la ley de Ohm, su comportamiento en un circuito. Por otro lado, se puede comprobar experimentalmente cómo la resistencia eléctrica de un material depende de sus dimensiones y su naturaleza. También se puede comprobar que la resistencia tiende a elevarse con la temperatura.

Contenido

2.1. **Conductores y aislantes**
2.2. **Resistencia eléctrica**
2.3. **Medida de la resistencia eléctrica**
2.4. **La ley de Ohm**
2.5. **Potencia eléctrica**
2.6. **Energía eléctrica**
2.7. **El efecto Joule**
2.8. **Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas**
2.9. **Resistencia de un conductor**
2.10. **Influencia de la temperatura sobre la resistividad**
2.11. **Resistencias para circuitos electrónicos**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Diferenciar entre aislante, buen conductor y mal conductor de la corriente eléctrica.
- Emplear el óhmetro de una forma adecuada.
- Aplicar la ley de Ohm para la resolución de problemas donde intervengan las magnitudes eléctricas: intensidad, tensión y resistencia.
- Aplicar las expresiones matemáticas de la potencia y energía eléctrica para resolver cuestiones prácticas.
- Relacionar la resistencia de un conductor con su longitud, sección y constitución.
- Calcular la resistencia eléctrica de un conductor.
- Valorar la influencia de la temperatura sobre la resistencia de los materiales.
- Identificar los diferentes tipos de resistencias que se utilizan como componentes en circuitos electrónicos, así como conocer sus aplicaciones y características más significativas.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

2.1 Conductores y aislantes

Para el buen funcionamiento de un circuito eléctrico existen dos elementos básicos, los conductores y los aislantes. Unos tienen tanta importancia como los otros, mientras que los primeros permiten el paso de la corriente con una relativa facilidad, los segundos la bloquean.

Así, por ejemplo, un cable eléctrico, como los que hemos utilizado para las experiencias, está formado por un alambre metálico de cobre (el conductor) y por un recubrimiento de plástico (el aislante) que impide que la corriente se fugue hacia otros lugares no deseados, al tiempo que evita fallos y descargas eléctricas indeseables (Figura 2.1).

Figura 2.1. Constitución de un cable eléctrico.

Los cuerpos aislantes de la electricidad se caracterizan por impedir el paso de la corriente eléctrica a través de ellos.

Este fenómeno se debe a que los electrones se encuentran ligados fuertemente a sus átomos y para arrancarlos es necesario aplicar mucha energía (someter al cuerpo a una elevada tensión).

Son buenos aislantes: *la porcelana, el aceite mineral, el caucho, el barniz, el vidrio, el algodón, la seda, el papel, el plástico, el aire seco, etc.*

A diferencia de los aislantes, los conductores permiten con facilidad el movimiento de electrones por su estructura molecular.

A continuación se expone una lista en la que aparecen clasificados algunos materiales conductores. Comenzamos por los mejores y terminamos por los peores:

Plata - cobre - oro - aluminio - cinc - estaño

hierro - plomo - maillechort - mercurio - nicrón - carbón

El material más empleado es el cobre, que conduce casi tan bien como la plata, y su coste es muy inferior.

El aluminio se utiliza en las líneas de transporte, ya que su peso es menor que el del cobre.

Por otro lado, se fabrican materiales a base de aleaciones como el nicrón (níquel-cromo), el constantán (cobre-níquel), el ferroníquel (hierro-níquel), el maillechort (cobre-cinc-níquel) y otros muchos más, que poseen la característica de ser mucho peor conductores que el cobre, lo que los hace útiles como materiales resistivos para la fabricación de resistencias (reostatos, elementos calefactores, etc.).

El carbón es bastante mal conductor lo que lo hace ideal para la fabricación de pequeñas resistencias para circuitos electrónicos.

2.2 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica como unidad de medida nos va a ayudar a diferenciar los cuerpos que son mejores conductores de los que son peores, de tal manera que podremos decir que un mal conductor posee mucha resistencia eléctrica, mientras que uno bueno tiene poca. De esta manera podemos decir que:

La resistencia eléctrica es la mayor o menor oposición que ofrecen los cuerpos conductores al paso de la corriente eléctrica.

Este fenómeno se podría explicar así: cuando los electrones circulan por un conductor, éstos tienen que moverse a través de todos los átomos, produciéndose una especie de rozamiento (resistencia al movimiento de electrones) que se transforma en calor (Figura 2.2). Estos choques son menores en los buenos conductores que en los malos.

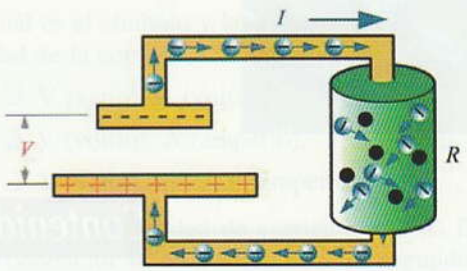


Figura 2.2. La resistencia se manifiesta como una oposición al movimiento de los electrones.

La unidad de medida de la resistencia eléctrica (símbolo R) es el ohmio y se representa por la letra griega omega Ω.

1 miliohmio = 1 mΩ = 0,001 Ω
1 kilohmio = 1 kΩ = 1.000 Ω
1 megaohmio = 1 MΩ = 1.000.000 Ω

Los símbolos más utilizados para la resistencia son los representados en la Figura 2.3.

Figura 2.3. Símbolos esquemáticos de la resistencia eléctrica.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

2.3 Medida de la resistencia eléctrica

El aparato que se utiliza para medir la resistencia eléctrica es el óhmetro.

Para medir el valor de una resistencia, bastará con conectar los extremos de ésta a las puntas del óhmetro (Figura 2.4).

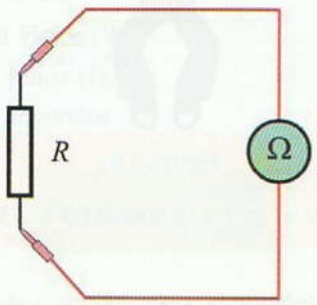


Figura 2.4. Medida de la resistencia con el óhmetro.

Existen muchos tipos de óhmetros, pero uno de los más conocidos y más utilizados para medir resistencias de una forma aproximada es el que incorpora el polímetro (Figura. 2.5). El puente de Wheatstone es otro aparato de medida para medir resistencias que se utiliza en aquellos casos que se quiera dar una mayor precisión a la medida. (Para ampliar información sobre el manejo del puente de Wheatstone, consultar la Unidad didáctica 9.)

Figura 2.5. El polímetro incorpora un óhmetro para la medida de resistencias.

Actividad experimental 2.1

Consigue un óhmetro (por ejemplo, el que se incluye en el polímetro) y mide la resistencia de varias lámparas y de cualquier otro aparato eléctrico que tengas a tu alcance.

Figura 2.6.

2.4 La ley de Ohm

Hasta ahora hemos estudiado con detenimiento varias magnitudes eléctricas: intensidad de la corriente, tensión y resistencia. En la práctica se nos pueden presentar problemas en los que conozcamos dos de estas magnitudes y tengamos que determinar la tercera. Para resolver estos problemas, y otros tantos que se presenten en la práctica, es necesario aplicar una fórmula que nos relacione las tres magnitudes eléctricas conocidas: I, V, R.

El físico Ohm, basándose en un experimento, determinó que la intensidad de la corriente que recorre un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión aplicada (a más tensión, más intensidad), e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (a más resistencia, menos intensidad).

$$I = \frac{V}{R}$$

Veamos cómo se puede explicar esta relación: al conectar una resistencia a los bornes de una pila, aparece una corriente eléctrica que circula a través de esta resistencia desde el polo negativo de la pila hasta el positivo (Figura 2.7). Recuerda que si existe corriente eléctrica es gracias a que el generador traslada las cargas del polo positivo al negativo, creando así una diferencia de cargas, que nosotros llamamos tensión eléctrica.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

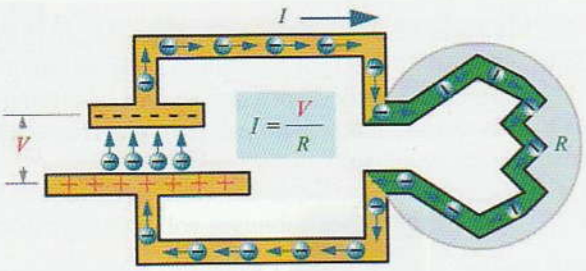


Figura 2.7.

Cuanto mayor es la tensión eléctrica, con mayor fuerza atraerá el polo positivo de la pila a los electrones que salen del negativo y atraviesan la resistencia, y por tanto, será mayor también la intensidad de la corriente por el circuito.

Cuanto mayor sea el valor óhmico de la resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica, menor será la intensidad de la misma.

Actividad resuelta 2.1

Calcula la intensidad que circula por la resistencia de un circuito electrónico de 100 Ω, cuando está sometida a una tensión de 4 V.

Solución: $I = \frac{V}{R} = \frac{4}{100} = 0{,}04 \text{ A} = 40 \text{ mA}$

La ley de Ohm se puede ampliar despejando, en la fórmula, los valores de V y de R, obteniéndose entonces las siguientes expresiones:

$$I = V/R \qquad V = RI \qquad R = V/I$$

Actividad resuelta 2.2

Se quiere determinar la resistencia eléctrica de una resistencia de película metálica. Para ello, se somete a la misma a una tensión de 12 V y, mediante un amperímetro intercalado en serie, se mide el paso de una intensidad de corriente de 12 mA (Figura 2.8).

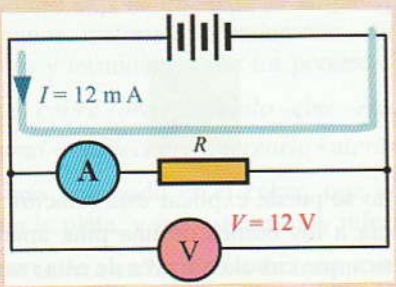


Figura 2.8.

Solución: $R = \frac{V}{I} = \frac{12 \text{ V}}{0{,}012 \text{ A}} = 1.000 \ \Omega = 1 \text{ k}\Omega$

Actividad resuelta 2.3

Es sabido que en condiciones desfavorables, es decir, con la piel húmeda, la resistencia del cuerpo humano es del orden de 2.500 Ω (Figura 2.9). ¿Qué tensión será suficiente para provocar, en estas condiciones, el paso de una corriente peligrosa, de 30 mA, por el cuerpo humano?

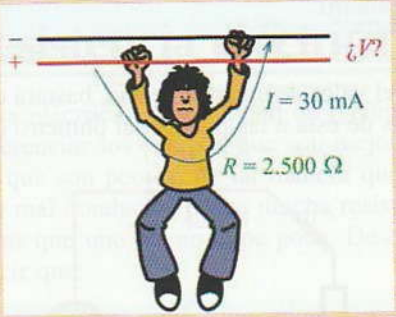


Figura 2.9.

Solución: $V = R \cdot I = 2.500 \cdot 0{,}03 = 75 \text{ V}$

Actividad propuesta 2.1

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.

Ejercicio	I	V	R
1º	5 A	500 mV	?
2º	20 A	?	5 Ω
3º	30 mA	1 V	?
4º	10 µA	200 V	?
5º	?	10 kV	15 kΩ
6º	10.000 A	?	600 mΩ

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

2.5 Potencia eléctrica

La unidad de potencia eléctrica es el vatio (W). Si nos preguntan qué lámpara luce más, una de 60 W o una de 40 W, la respuesta será muy clara: la de 60 W, que es la que más potencia posee. Pero, ¿qué es la potencia eléctrica?

En la asignatura de física, se suele definir la potencia como la rapidez con la que se ejecuta un trabajo, es decir la rela-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

ción que existe entre el trabajo realizado y el tiempo invertido en realizarlo.

Como todos sabemos, el trabajo se produce gracias a la energía. Trabajo y energía son dos conceptos que dicen lo mismo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}$$

$$P = \frac{E}{t}$$

P = Potencia en vatios (W).

E = Energía en julios (J).

t = Tiempo en segundos (s).

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo}}$$

Desde el punto de vista eléctrico, la potencia se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$P = V \cdot I$$

La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de la corriente.

Actividad resuelta 2.4

Calcula la potencia que consume una resistencia limitadora al conectarla a una tensión de 12 V, si su resistencia es de 1 kΩ.

Solución: Primero calculamos la intensidad, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{1.000} = 0{,}012 \text{ A}$$

$$P = V \cdot I = 12 \cdot 0{,}012 = 0{,}144 \text{ W}$$

Actividad resuelta 2.5

La potencia máxima que es capaz de proporcionar una fuente de alimentación es de 10 W. Se quiere saber si será capaz de proporcionar una corriente de 200 mA a un amplificador de 12 V.

Solución:

$$P = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{10 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 0{,}833 \text{ A} = 833 \text{ mA}$$

La fuente es capaz de entregar hasta 833 mA, por lo que se podrá conectar el amplificador sin problemas.

Actividad resuelta 2.6

La placa de características de una plancha eléctrica indica que su potencia es de 1.000 W y su tensión nominal de 220 V. Calcula el valor de la resistencia de caldeo.

Solución: $P = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{V} = \cdots = 4{,}55 \text{ A}$

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \cdots = 48{,}35 \ \Omega$$

Este problema también se podía haber resuelto determinando primero una fórmula que relacione P, I y R:

$$P = V \cdot I \longrightarrow P = R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2$$

$$V = R \cdot I \longrightarrow$$

$$\boxed{P = R \cdot I^2}$$

Despeja R de la fórmula obtenida y comprueba el resultado.

Actividad resuelta 2.7

Se dispone de una lámpara incandescente de la que sólo se conoce su potencia de trabajo: 100 W, y la resistencia de su filamento: 1,5 Ω. ¿A qué tensión se podrá conectar la lámpara para que funcione correctamente?

Solución: Este problema entraña un poco más de complejidad. Para resolverlo, habrá que encontrar, primero, una fórmula que relacione P, V y R.

$$P = V \cdot I \longrightarrow P = V \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}$$

$$I = \frac{V}{R} \longrightarrow$$

Despejando: $V = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{100 \cdot 1{,}5} = 12{,}2 \text{ V}$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad propuesta 2.2

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2.

Ejercicio	I	V	R	P
1º	5 A	500 mV	?	?
2º	20 A	?	5 Ω	?
3º	30 mA	?	?	5 W
4º	?	200 V	?	5 W
5º	?	10 kV	15 kΩ	?
6º	?	?	600 mΩ	1 kW

** *La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

2.5.1. Medida de la potencia eléctrica

El aparato que mide la potencia eléctrica es el vatímetro.

En realidad, el vatímetro mide por separado la tensión y la intensidad de la corriente, para después realizar la operación $P = V \cdot I$ (Figura 2.10).

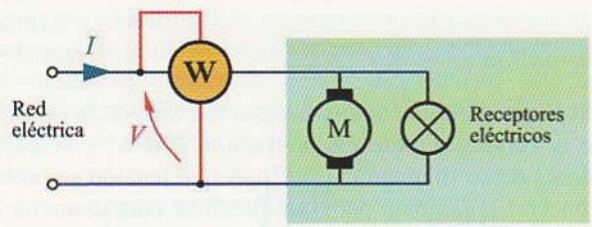


Figura 2.10. **Esquema de conexiones de un vatímetro.**

2.6 Energía eléctrica

De la expresión que relaciona la energía con la potencia, se deduce que la energía es el producto de la potencia por el tiempo. El cálculo de la energía eléctrica consumida por un receptor es muy interesante, especialmente para los consumidores, ya que sobre él se establecen los costes que facturan las compañías eléctricas.

$P = \frac{E}{t}$, despejando $E = P \cdot t$

¿Cuál es la unidad de medida de la energía eléctrica? Todo dependerá de las unidades que se tomen de la potencia y del tiempo.

$E = P \cdot t$			
P (W)	t (s)	P (kW)	t (h)
E = W · s = Julios		E = kW · h = kilovatios · hora	

El julio es la unidad perteneciente al sistema internacional. Como es muy pequeña, se suele utilizar más el kWh.

Actividad resuelta 2.8

Calcula la energía, en kWh y julios, consumidos por un televisor de 200 W en 8 horas de funcionamiento.

Solución:

$$E = P \cdot t = \frac{200}{1.000}\,(\text{kW}) \cdot 8\ \text{h} = 1{,}6\ \text{kWh}$$

$$E = P \cdot t = 200\ \text{W}\ (8\ \text{h} \cdot 3.600)\ \text{s} = 5.760.000\ \text{julios}$$

2.7 El efecto Joule

Los cuerpos conductores que poseen naturaleza resistiva se calientan cuando son atravesados por una corriente eléctrica. A este fenómeno se le denomina «efecto Joule».

El físico P. James Joule estudió la relación que existe entre la energía y su transformación plena en calor. A base de experimentar con un calorímetro, llegó a la conclusión de que la energía de 1 julio es equivalente a 0,24 calorías.

$$Q = 0{,}24 \cdot E$$

Q = Calor en calorías.

E = Energía en julios.

Recordemos que la energía viene dada por la siguiente expresión:

$$E = P \cdot t$$

E = Julios.

P = Vatios.

t = Segundos.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 2.9

Calcula el calor desprendido por una resistencia perteneciente a la placa de un circuito impreso, si su potencia es de 1 W y está funcionando durante 8 horas.

Solución: La energía en julios consumida durante ese período de tiempo es:

$$E = P \cdot t = 1\ \text{W} \cdot 8\ \text{h} \cdot 60 \cdot 60 = 28.800\ \text{julios}$$

$$Q = 0{,}24\,E = 0{,}24 \cdot 28.800 = 6.912\ \text{calorías}$$

2.8 Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas

Los excesos de temperatura que se pueden producir en los conductores por el efecto Joule los pueden destruir inmediatamente. Éste es el caso del cortocircuito (corriente muy elevada que no puede durar mucho tiempo porque destruye todos los elementos del circuito que se encuentran a su paso). Las sobrecargas tardan más en dañar el conductor. Aun así, los excesos constantes de temperatura de los materiales aislantes hacen que se envejezcan con más rapidez, limitando la vida útil del conductor (los aislantes sometidos a altas temperaturas acaban volviéndose quebradizos y perdiendo parte de sus propiedades aislantes).

Para la protección contra cortocircuitos y sobrecargas se emplean los fusibles y los interruptores automáticos.

2.8.1. El cortocircuito

El cortocircuito se produce cuando se unen accidentalmente las dos partes activas del circuito eléctrico. Estos accidentes suelen ser provocados por un error en el montaje del circuito, fallo de un aislamiento que separa las partes activas o por una falsa maniobra (Figura 2.11).

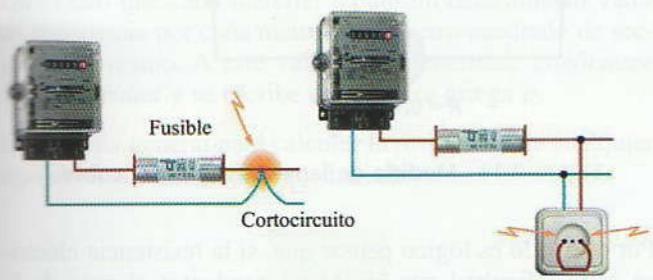


Figura 2.11. Ejemplos de cortocircuito accidental.

En un cortocircuito la intensidad de corriente que aparece es muy elevada, debido a que la única resistencia que existe en el circuito es la propia de los conductores de línea. En el caso de que esta resistencia sea muy baja o cuando trabajamos con tensiones elevadas, pueden llegar a establecerse miles de amperios ($I_{CC} = V/R_{\text{línea}}$). Si esta fuerte intensidad no se corta inmediatamente, los conductores se destruyen por efecto del calor ($Q = 0{,}24 \cdot R_{\text{línea}} \cdot I^2 \cdot t$) en un corto período de tiempo (a veces ni siquiera llega a unos pocos milisegundos).

2.8.2. La sobrecarga

Se produce una sobrecarga cuando hacemos pasar por un conductor eléctrico más intensidad de corriente que la nominal (intensidad para la que ha sido calculada la línea).

Las sobrecargas pueden venir provocadas por conectar demasiados receptores en una línea eléctrica, por un mal funcionamiento de un receptor o componente electrónico que tiende a un mayor consumo eléctrico o por un motor eléctrico, que es obligado a trabajar a mayor potencia que la nominal.

Las sobrecargas originan un aumento de intensidad por los conductores que, con el tiempo suficiente, puede llegar a provocar su destrucción por elevación de temperatura.

2.8.3. Fusibles

Un fusible está compuesto por un hilo conductor de menor sección que los conductores de la línea. En caso de una sobrecarga o cortocircuito, la intensidad se eleva a valores peligrosos para los conductores de la línea y el fusible, que es más débil, se funde debido al efecto Joule e interrumpe el circuito antes de que la intensidad de la corriente alcance esos valores peligrosos.

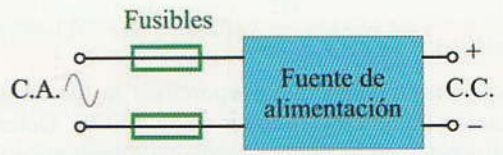


Figura 2.12. Fusibles protegiendo una fuente de alimentación.

Para que el hilo del fusible se caliente antes que los conductores de la línea, debe ser de mayor resistencia eléctrica. Esto se consigue con un hilo de menor sección o con un hilo de mayor coeficiente de resistividad. Por otro lado, este hilo debe tener un punto de fusión más bajo que los conductores de línea que protege.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Hoy en día, para la fabricación de hilos de los fusibles, se emplean aleaciones especiales estudiadas para conseguir los mejores resultados. Estas aleaciones pueden ser de cobre-plata, plomo-estaño, etc.

Cuando un hilo de fusible se funde, las gotas de material en estado líquido se proyectan, lo que puede producir quemaduras y accidentes, incluido el peligro de incendio. Por esta razón, los hilos de fusibles se deben colocar en el interior de recipientes herméticamente cerrados, con lo que da lugar a los llamados cartuchos de fusibles. En la Figura 2.13 se muestra, como ejemplo, el aspecto de una gama de cartuchos fusibles comerciales de diferente tamaño, así como sus calibres en amperios.

			Calibrados en amperios										
Tamaño	V	kA	2	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80
8 x 31	380	20												
10 x 38	500	100												
14 x 51	500	100												
22 x 58	500	100												

Figura 2.13. Gama de cartuchos comerciales calibrados en amperios.

Una de las ventajas de los cartuchos fusibles es que están calibrados en amperios. El calibre de un fusible nos indica la intensidad que puede pasar por él sin fundirse. Cuando se supera esta intensidad, el fusible corta el circuito. La rapidez con que lo hace está en función de lo alta que sea la intensidad del fallo.

Actividad resuelta 2.10

La potencia máxima que proporciona la fuente de alimentación de un amplificador es de 400 W. Determina el cartucho fusible necesario para la protección de la misma, si la tensión de la red es de 230 V.

Solución: $I = \frac{P}{V} = \frac{400}{230} = 1{,}74$ A

Si consultamos la gama de cartuchos fusibles comerciales de la Figura 2.12, el calibre del fusible que más se acerca por exceso es el de 2 A.

Los fusibles resultan muy seguros en la protección de cortocircuitos, pero presentan el inconveniente de que son difíciles de reponer. Al fundirse el fusible queda inutilizado, por lo que hay que encontrar otro de las mismas características y realizar la operación de recambio. En muchas ocasiones esta operación resulta engorrosa y, si no se hace por un especialista, puede ser hasta peligrosa. Además, los fusibles reaccionan muy lentamente ante las sobrecargas.

Los interruptores automáticos, también conocidos con el nombre de disyuntores, están sustituyendo en muchas aplicaciones a los fusibles, ya que protegen bien contra los cortocircuitos y actúan ante las sobrecargas más rápidamente y de forma más selectiva. Así, por ejemplo, en las viviendas se instala un cuadro de mando y protección con varios interruptores automáticos. Cada uno de estos dispositivos protege de las sobrecargas y cortocircuitos a cada uno de los circuitos independientes de la vivienda.

2.9 Resistencia de un conductor

Como ya pudimos estudiar con anterioridad, la resistencia de los diferentes materiales depende fundamentalmente de su naturaleza. Por otro lado, las dimensiones de esos materiales también influyen de forma decisiva en su resistencia final. Esto tiene una especial importancia en los cálculos de la sección de conductores eléctricos, ya que una resistencia elevada provoca su calentamiento y su probable deterioro.

Si midiésemos la resistencia de un conductor de cobre de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado de 0,017 Ω (Figura 2.14). Este resultado nos indica que, por cada metro de conductor de cobre de un milímetro cuadrado de sección, la resistencia será de 0,017 ohmios.

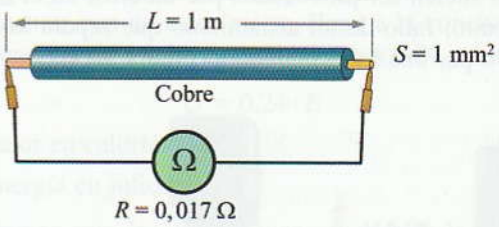


Figura 2.14. Medida de la resistividad del cobre.

Por otro lado es lógico pensar que, si la resistencia eléctrica es la dificultad que ofrece un conductor al paso de la corriente eléctrica, esta dificultad irá aumentando con la

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

distancia que tiene que recorrer; es decir, a mayor longitud mayor resistencia. Así, por ejemplo, si ahora midiésemos la resistencia de un conductor de 2 m de cobre de 1 mm^2 observaríamos que la resistencia ha aumentado al doble (0,034 Ω).

- ***La resistencia de un conductor aumenta con su longitud***

Si, por el contrario, se aumenta la sección del conductor, los electrones tendrán más libertad para moverse y, por tanto, la resistencia será menor. Así, por ejemplo, si midiésemos la resistencia de un conductor de 1 m de cobre de 2 mm^2, daría como resultado un valor óhmico de la mitad (0,0085 Ω).

- ***La resistencia de un conductor disminuye con su sección***

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la expresión matemática necesaria para determinar la resistencia de un conductor de cobre (R_{cu}) podría quedar así:

$$R_{cu} = 0{,}017 \frac{L}{S}$$

0,017 = Resistencia en ohmios por cada metro de conductor de 1 mm^2.

L = Longitud del conductor en m.

S = Sección del conductor en mm^2.

Lógicamente, esta fórmula sólo será válida para calcular la resistencia de conductores de cobre. ¿Qué expresión utilizaremos, entonces, para otros materiales? Como ya se dijo, existen materiales que son mejores conductores que otros; así, por ejemplo, el aluminio es peor conductor que el cobre. De tal forma que si midiésemos ahora la resistencia de un conductor de aluminio de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado igual a 0,028 ohmios.

Está claro que cada material tendrá un determinado valor de resistencia por cada metro y milímetro cuadrado de sección del mismo. A este valor se le denomina: *coeficiente de resistividad* y se escribe con la letra griega ρ.

La fórmula general para calcular la resistencia de cualquier tipo de conductor podría quedar así:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ = Coeficiente de resistividad ($\Omega \cdot mm^2/m$).

L = Longitud del conductor (m).

S = Sección del conductor (mm^2).

R = Resistencia del conductor (Ω).

En la Tabla 2.3, se expone una lista con el coeficiente de resistividad, a 20 °C de temperatura, de los materiales más utilizados.

Tabla 2.3. Resistividad de conductores y aislantes a 20 °C.

Material	Símbolo	ρ ($\Omega \cdot mm^2/m$)
Plata	Ag	0,0163
Cobre	Cu	0,017
Oro	Au	0,023
Aluminio	Al	0,028
Cinc	Zn	0,061
Latón	Cu-Ni	0,07
Estaño	Sn	0,12
Hierro	Fe	0,13
Plomo	Pb	0,204
Maillechort	Cu-Zn-Ni	0,3
Constantán	Cu-Ni	0,50
Ferroníquel	Fe-Ni	0,86
Mercurio	Hg	0,957
Nicrón	Ni-Cr	1

Actividad resuelta 2.11

¿Qué resistencia tendrá un conductor de cobre de 20 m de longitud y 1 mm^2 de sección?

Solución: $R = \rho \frac{L}{S} = 0{,}017 \frac{20}{1} = 0{,}34\ \Omega$

Actividad resuelta 2.12

¿Y un conductor de aluminio de las mismas dimensiones?

Solución: $R = \rho \frac{L}{S} = \cdots = 0{,}56\ \Omega$

Actividad resuelta 2.13

¿Qué sección poseerá un conductor de constantán de 12 m de longitud, si se ha medido una resistencia entre sus terminales de 6 Ω?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución: $R = \rho \dfrac{L}{S}$,

despejando $S = \rho \dfrac{L}{R} = 0{,}5 \dfrac{12}{6} = 1 \text{ mm}^2$

Actividad resuelta 2.14

Se desea medir la longitud de una bobina de cobre. Para no tener que desenrollar el conductor, se mide con un óhmetro conectado a los extremos de la bobina, una resistencia de 1 Ω. Mediante un calibre medimos el diámetro del conductor = 0,5 mm (Figura 2.15).

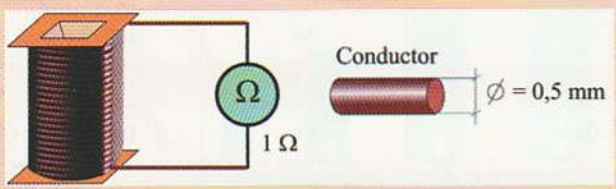


Figura 2.15.

Solución: Como la sección es circular:

$$S = \pi r^2 = 3{,}1416 \cdot 0{,}25^2 = 0{,}2 \text{ mm}^2$$

$R = \rho \dfrac{L}{S}$, despejando $L = \dfrac{R \cdot S}{\rho} = \dfrac{1 \cdot 0{,}2}{0{,}017} = 11{,}8$ m

Actividad propuesta 2.3

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4.

Ejercicio	R (Ω)	L (m)	S (mm²)	ρ
1º	?	50	4	Cinc
2º	5	?	0,5	Maillechort
3º	2	5	?	Aluminio
4º	0,01	?	0,25	Oro
5º	10	?	0,25	Oro

** *La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

2.10 Influencia de la temperatura sobre la resistividad

Actividad experimental 2.2

Consigue una lámpara de linterna y mide con el óhmetro su resistencia en frío. Seguidamente, conecta la lámpara a una pila y, mediante un amperímetro y un voltímetro, determina los valores de I y de V (Figura 2.16). Con ellos determina el valor de la resistencia óhmica del filamento en caliente, aplicando la ley de Ohm. Compara los resultados obtenidos. ¿Obtuviste los mismos resultados en los dos casos?

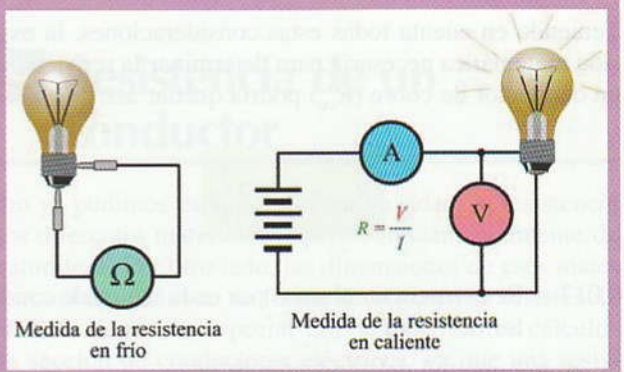


Figura 2.16.

Seguro que no. Al medir la resistencia con el óhmetro, la lámpara está apagada y, por tanto, el filamento se encuentra frío, es decir, a temperatura ambiente. Por otro lado, cuando aplicamos la ley de Ohm para calcular la resistencia, se hace con los datos correspondientes al estado de encendido de la lámpara. Hay que tener en cuenta que en ese estado, el filamento se encuentra a una temperatura de unos 2.000 °C. Y es que la resistencia eléctrica se eleva sustancialmente en casi todos los conductores al elevarse su temperatura, de ahí que en una lámpara incandescente la resistencia en frío sea muy inferior a cuando está caliente.

Por lo general, la resistencia aumenta con la temperatura en los conductores metálicos. Este aumento depende del incremento de la temperatura y de la materia de que esté constituido dicho conductor.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

$$R_{t^o} = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t^o)$$

R_{t^o} = Resistencia en caliente.

R_0 = Resistencia a 20 °C.

α = Coeficiente de temperatura a 20 °C.

Δt^o = Elevación de temperatura en °C.

Con esta expresión se puede calcular la resistencia a una temperatura dada (R_{t^o}), conociendo la temperatura de la resistencia en frío (R_0), la elevación de la temperatura (Δt^o) y el coeficiente de temperatura (α), que será diferente para cada material. En la Tabla 2.5 se dan los coeficientes de temperatura de los materiales más utilizados.

Tabla 2.5. Coeficientes de temperatura a 20 °C de las resistencias.

Material	α	Material	α
Oro	0,0035	Constantán	0,0001
Plata	0,0036	Wolframio	0,0005
Aluminio	0,00446	Hierro	0,00625
Cobre	0,0039	Ferroníquel	0,00093
Estaño	0,0044	Maillechort	0,00036

El aumento de la resistencia con la temperatura es, a veces, un gran inconveniente; así ocurre, por ejemplo, en las medidas eléctricas, que pueden verse distorsionadas por este fenómeno. Por esta razón, es conveniente utilizar materiales con un bajo coeficiente de temperatura para la construcción de los aparatos de medida.

En otros casos, este aumento de resistencia con la temperatura puede ser beneficioso; como por ejemplo, para medir temperaturas por medio de resistencias que poseen un alto coeficiente de temperatura (termómetros electrónicos).

Existen materiales en los cuales se reduce la resistencia al aumentar su temperatura. En estos casos se dice que poseen un coeficiente de temperatura negativo. En general, los materiales semiconductores pertenecen a este grupo. En especial existen resistencias construidas con semiconductores especialmente diseñadas para reducir su resistencia cuando aumenta la temperatura, como las NTC.

Actividad resuelta 2.15

Medimos la resistencia de una fase de un bobinado de cobre de un motor antes de haber funcionado (a la temperatura de 20 °C), obteniendo un resultado de 4 ohmios. Determina la resistencia que alcanzará cuando esté en funcionamiento a una temperatura de 75 °C.

Solución: $R_{t^o} = R_0(1 + \alpha\Delta t^o)$

$$R_{75\,^\circ C} = 4 \cdot (1 + 0{,}0039 \cdot 55) = 4{,}86\ \Omega$$

Actividad resuelta 2.16

¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente con filamento de wolframio, si al medir su resistencia a temperatura ambiente (20 °C) obtuvimos un resultado de 358 Ω, habiéndose calculado una resistencia en caliente de 807 Ω?

Solución: De la expresión original despejamos el incremento de temperatura:

$$\Delta t^o = \left(\frac{R_{t^o}}{R_0} - 1\right) / \alpha = \left(\frac{807}{358} - 1\right) / 0{,}0005 = 2.508\,^\circ C$$

Actividad resuelta 2.17

Determina la corriente que aparecerá en la lámpara incandescente de la Actividad resuelta 2.16 al conectarla a 230 V y en los siguientes casos: a) nada más conectarla, b) una vez encendida.

Solución: a) Nada más conectar la lámpara el filamento se encuentra a 20 °C y su resistencia es de 358 Ω.

$$I = \frac{V}{R_{20\,^\circ C}} = \frac{230}{358} = 0{,}64\ A$$

b) Al aumentar la temperatura hasta los 2.508 °C, la resistencia aumenta su valor hasta 807 Ω, produciéndose una disminución y estabilización de la corriente.

$$I = \frac{V}{R_{2.508\,^\circ C}} = \frac{230}{807} = 0{,}29\ A$$

Como se ha podido comprobar en la tabla de coeficientes de temperatura, existen aleaciones, como el constantán, que apenas varían con la temperatura, lo que las hace ideales para la fabricación de resistencias en las que sea importante la estabilidad de su valor óhmico con los cambios de temperatura.

Actividad propuesta 2.4

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.6.

R_{t^o} = Resistencia en caliente.

R_0 = Resistencia a 20 °C.

α = Coeficiente de temperatura a 20 °C.

Δt^o = Elevación de temperatura en °C.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tabla 2.6.

Ejercicio	R_t (Ω)	R_0 (Ω)	α	Δt^o (°C)
1º	?	30	Plata	100
2º	1.000	?	Aluminio	50
3º	50	49	?	200
4º	200	199	Cobre	?

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

2.11 Resistencias para circuitos electrónicos

En electricidad, las resistencias cumplen una misión que ya todos conocemos, la de oponerse al paso de la corriente y transformar la energía eléctrica en calor. En unos casos este efecto es beneficioso (resistencias calefactoras de estufas y cocinas eléctricas, filamentos de lámparas incandescentes, etc.) y en otros perjudicial (calentamiento de conductores y pérdida de potencia).

En los circuitos electrónicos, las resistencias cumplen un papel mucho más especial: permiten distribuir adecuadamente la tensión y la corriente eléctrica en los diferentes puntos del circuito. Para realizar esta correcta distribución se basan, en todo momento, en la ley de Ohm.

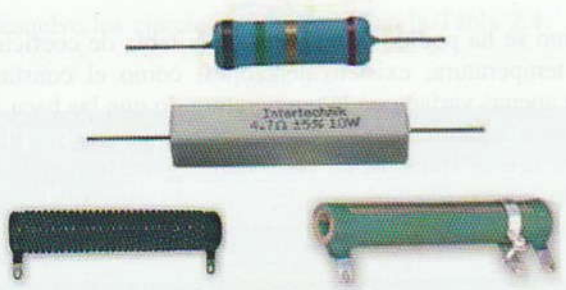


Figura 2.17. **Resistencias para circuitos electrónicos.**

En los circuitos electrónicos, estas corrientes y tensiones suelen ser muy pequeñas y, por tanto, las potencias que deben disipar también lo serán. Estas bajas potencias permiten construir las resistencias de pequeños tamaños con otro tipo de materiales más baratos y sencillos de manejar, tales como el carbón finamente troceado.

2.11.1. Tolerancia de una resistencia

Como ya sabemos, la unidad de medida que caracteriza a una resistencia es el ohmio. Las resistencias se construyen con diferentes valores óhmicos, pero, ¿son exactos los valores que, según los fabricantes, poseen las resistencias?

Obtener, en un proceso de fabricación, una resistencia con un valor exacto es muy difícil. Es más, cuanto mayor sea la exactitud que se puede asegurar que tiene una resistencia, más se encarece el producto. De aquí nace el concepto de tolerancia. Éste indica los valores máximo y mínimo entre los que estará comprendida la resistencia. Estos valores se expresan como un porcentaje del valor en ohmios asignado teóricamente.

Actividad resuelta 2.18

Se quieren determinar los valores en que puede estar comprendida una resistencia de 100 Ω, si el fabricante asegura que ésta posee una tolerancia del ±8%.

Solución: El 8% de 100 Ω es exactamente 8 Ω. Los valores buscados son:

$$100 + 8 = 108\ \Omega \quad \text{y} \quad 100 - 8 = 92\ \Omega$$

Si nosotros realizásemos ahora una verificación del valor óhmico de esta resistencia con un óhmetro de precisión y obtuviésemos un resultado menor que 92 Ω o mayor que 108 Ω, la medida mostraría que dicha resistencia no cumple con la tolerancia marcada.

Las tolerancias están normalizadas, de tal forma que sólo existen en el mercado resistencias con los siguientes valores:

±0,5%, ±1%, ±2%, ±5%, ±10% ±20%, ±50%

±0,5% y ±1% para resistencias de gran precisión.

±2%, ±5% y ±10% son las más utilizadas en la práctica.

±20% y ±50% están prácticamente en desuso.

2.11.2. Código de colores

La forma de inscribir el valor de una resistencia para que sea fácilmente identificable a simple vista, es la de utilizar una serie de anillos de colores pintados sobre la superficie del cuerpo de la resistencia, que, mediante un código, permite cubrir toda la gama de valores de resistencias existentes en el mercado.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La razón de utilizar este sistema es debido a que el reducido tamaño de éstas impide que sobre ellas puedan inscribirse cifras que sean legibles.

Toma una resistencia y obsérvala. Apreciarás que existen tres anillos de diferentes colores y un cuarto un poco más separado de éstos. Los tres primeros anillos que vamos a denominar: A, B y C dan la clave del valor óhmico y el cuarto representa la tolerancia (Figura 2.18).

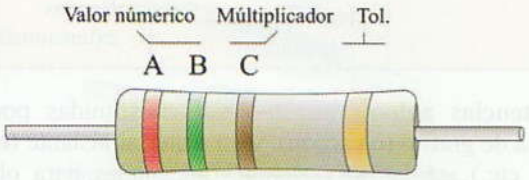


Figura 2.18. Las resistencias poseen una serie de anillos de color que nos indican el valor óhmico.

En la Tabla 2.7 está representado el código de colores:

Tabla 2.7. Código de colores para resistencias.

Color	A 1ª cifra	B 2ª cifra	C Multiplicador	Tolerancia
Negro	0	0	× 1	
Marrón	1	1	× 10	± 1%
Rojo	2	2	× 100	± 2%
Naranja	3	3	× 1000	
Amarillo	4	4	× 10000	
Verde	5	5	× 100000	± 0,5%
Azul	6	6	× 1000000	
Violeta	7	7	× 10000000	± 0,1%
Gris	8	8	× 100000000	
Blanco	9	9	× 1000000000	
Oro	—	—	× 0,1	± 5%
Plata	—	—	× 0,01	± 10%
Sin color	—	—		± 20%

Actividad resuelta 2.19

Determina el valor óhmico y la tolerancia de una resistencia que aparece con los colores: Rojo-Azul-Naranja-Plata.

Solución: Situemos las cifras que van asociadas a los colores en el orden en que aparecen inscritos:

A	B	C	Tol.
Rojo	Azul	Naranja	Plata
(2)	(6)	(× 1.000)	(± 10%)

$26 \cdot 1.000 = 26.000\ \Omega = 26\ k\Omega \pm 10\%$

El código de colores puede incluir 4, 5 y hasta 6 anillos de color.

En el caso de 5 anillos, los tres primeros (A, B, C) dan el valor numérico, el cuarto (D) el multiplicador y el quinto (E) la tolerancia (Figura 2.19).

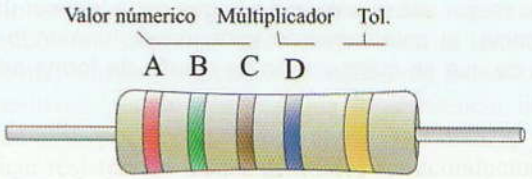


Figura 2.19. Resistencia con 5 anillos de color.

En el caso de las resistencias que se identifican con 6 anillos, el último de éstos nos indica el coeficiente de temperatura α.

Actividad resuelta 2.20

Determina el valor óhmico y la tolerancia de una resistencia que aparece con los colores: Amarillo-Azul-Rojo-Naranja-Marrón.

Solución: Situemos las cifras que van asociadas a los colores en el orden en que aparecen inscritos:

A	B	C	D	Tol.
Amarillo	Azul	Rojo	Naranja	Marrón
(4)	(6)	(2)	(× 1.000)	(± 1%)

$462 \cdot 1.000 = 462.000\ \Omega = 462\ k\Omega \pm 1\%$

Actividad propuesta 2.5

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8.

Ejerc.	Colores				Valores	
	A	B	C	Tol.	R	Tol.
1	Violeta	Rojo	Rojo	Plata	?	?
2	?	?	?	?	250 kΩ	1%
3	Verde	Azul	Naranja	Rojo	?	?
4	?	?	?	?	100 kΩ	5%
5	Amarillo	Rojo	Verde	Oro	?	?
6	?	?	?	?	100 Ω	2%
7	Naranja	Azul	Marrón	Marrón	?	?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

2.11.3. Potencia de disipación de una resistencia

La misión de una resistencia en un circuito electrónico no es precisamente la de calentarse, pero resulta inevitable que se produzca este fenómeno. Este calentamiento dependerá de la mayor o menor potencia a que esta resistencia trabaje. Dicha potencia, a su vez, dependerá de los valores de tensión e intensidad a que esté sometida.

Cuanto mayor sea la potencia a la que deba trabajar una resistencia, el calentamiento será mayor, corriendo el riesgo de que se queme si no se diseña de forma adecuada.

Lógicamente, cuanto mayor sea el tamaño de la resistencia, mejor podrá evacuar o disipar el calor que produce. Es por esta razón que se fabrican resistencias de varios tamaños. De tal forma que las resistencias aumentan de tamaño de acuerdo con la potencia a disipar.

En el mercado existen resistencias que van desde 1/8 de vatio (0,125 W) hasta más de 100 W (Figura 2.20).

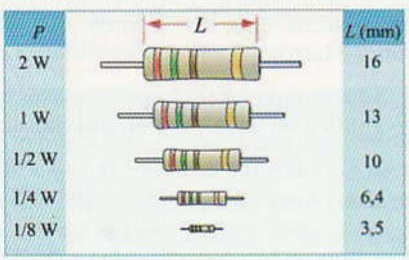


Figura 2.20. Tamaño de las resistencias en función de su potencia.

2.11.4. Clasificación de las resistencias

Existen en el mercado varios tipos de resistencias confeccionadas con diferentes procesos de fabricación. Esta amplia gama permite la elección del tipo más idóneo para cada aplicación específica.

En la Tabla 2.9 se muestra una clasificación de los diferentes tipos de resistencias.

2.11.5. Resistencias fijas

Como su nombre indica, poseen un valor de resistencia fijo.

Tabla 2.9. Clasificación de las resistencias.

Fijas	Variables	Resistencias dependientes
– Aglomeradas – De película de carbón – De película metálica – Bobinadas	– Potenciómetros de capa de carbón – Potenciómetros bobinados – Potenciómetros multivuelta – Potenciómetros miniatura	– NTC – PTC – LDR – VDR – MDR – Bandas extensiométricas

Resistencias aglomeradas: Están constituidas por una mezcla de grafito (o carbón), y un material aislante (resina, talco, etc.), en las proporciones adecuadas para obtener una determinada gama de valores.

En los extremos del cilindro se colocan unos casquillos a presión donde van soldados los hilos. Por último, se recubre el conjunto por una resina o se plastifica y se pintan los colores que indicarán el valor de la resistencia.

El inconveniente que presentan es que su valor cambia en exceso con la temperatura, por lo que son poco empleadas.

Resistencias de película de carbón: Son las más usadas para pequeñas potencias. Consisten en un cilindro aislado en el que se deposita una delgada película de carbón con dos casquillos metálicos en los extremos (Figura 2.21).

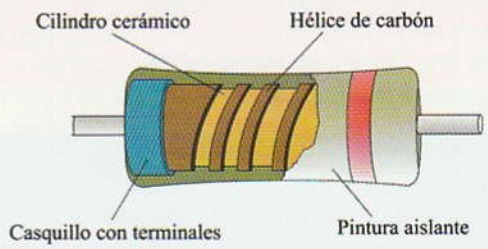


Figura 2.21. Resistencia de película de carbón.

Para obtener el valor óhmico de la resistencia, se practican unos surcos en espiral a lo largo de la película de carbón. Con un control preciso del paso de la espiral, se fabrican resistencias de muchos valores y de buena precisión.

Sobre este conjunto se deposita la capa de esmalte y se pintan los anillos de colores.

Resistencias de película metálica: Estas resistencias son básicamente iguales que las anteriores, con la diferencia de que utilizan una película de una aleación metálica que las hace muy estables con la temperatura. Con ellas se consiguen unas tolerancias muy bajas.

Resistencias bobinadas: Están fabricadas a base de bobinar hilo resistivo (generalmente una aleación de Ni-Cr-Al) sobre un cilindro aislante hasta obtener el valor óhmico de-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

seado. Se utilizan para grandes potencias, por lo que el recubrimiento exterior es de porcelana o esteatita. La tolerancia habitual es del 10% y son capaces de disipar potencias por encima de los 100 vatios (Figura 2.22).

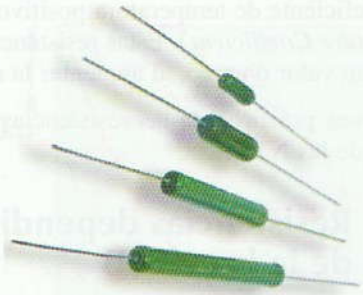


Figura 2.22. **Resistencias bobinadas.**

2.11.6. Resistencias variables

Son resistencias a las que se les puede modificar su valor óhmico desde cero hasta su valor nominal.

Estas resistencias, también llamadas potenciómetros, se utilizan para ajustar las magnitudes eléctricas de los circuitos, o bien como control externo de aparatos electrónicos de uso general, tales como control de volumen, luminosidad de una pantalla de televisión, etc.

La estructura de estas resistencias consiste en una resistencia fija (que puede ser de película de carbón o bobinada) construida sobre un soporte circular por el cual se desplaza un contacto móvil o cursor (Figura 2.23). Este contacto está unido a un tercer terminal de conexión. De esta forma, puede obtenerse el valor óhmico que se desee entre cualquiera de los extremos del potenciómetro y el punto móvil.

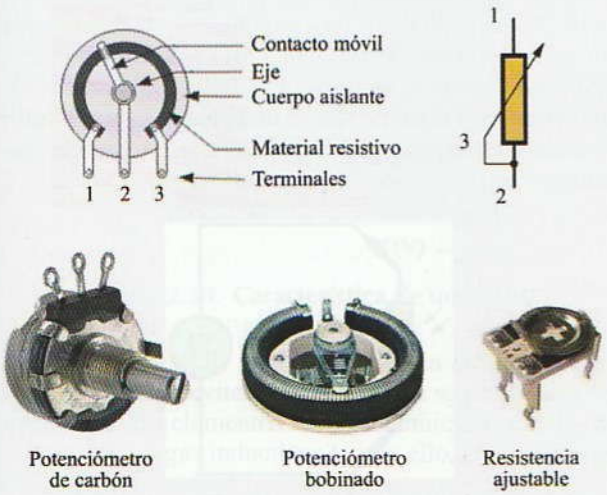


Figura 2.23. **Resistencias variables.**

2.11.7. Resistencias dependientes

Existen algunas aplicaciones prácticas en las que es de gran utilidad el disponer de componentes cuya resistencia óhmica se modifique bajo la acción de una variable física, como la temperatura, la luz, la tensión, la presión, la tracción mecánica, etc.

2.11.7.1. Resistencias dependientes de la temperatura

Por lo general, las resistencias fabricadas con materiales metálicos modifican su valor óhmico con la temperatura. En la mayoría de los metales el coeficiente de temperatura es positivo, lo que significa que la resistencia tiende a aumentar un poco con la temperatura. Pues bien, se pueden fabricar resistencias a base de óxidos semiconductores que exageren esta dependencia del valor óhmico con la temperatura. De esta forma, se pueden construir resistencias con coeficiente de temperatura negativo (NTC) y resistencias con coeficiente de temperatura positivo (PTC).

Este tipo de resistencias será de gran utilidad para aplicaciones en las que sea necesario el control, la compensación, la regulación y la medida de la temperatura.

Actividad experimental 2.3

Consigue una resistencia NTC y, mediante el óhmetro, mide su valor óhmico a temperatura ambiente. Seguidamente y sin desconectar el aparato de medida, acerca paulatinamente a la superficie de la NTC una lámpara incandescente encendida, para conseguir así aumentar su temperatura (Figura 2.24). Comprueba cómo el valor óhmico de la resistencia se hace más pequeño con los aumentos de la temperatura.

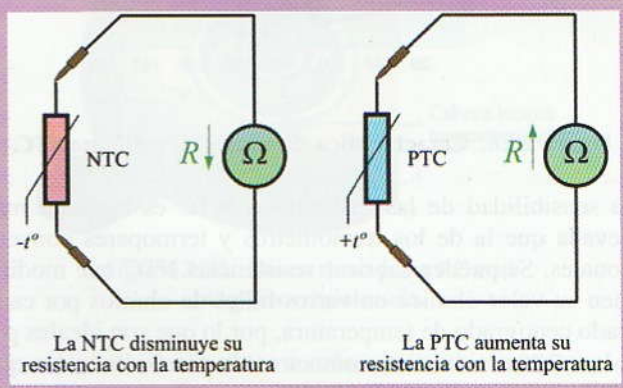


Figura 2.24.

Repite la misma experiencia con una resistencia PTC.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Como sus siglas nos indican (*NTC*, ***N**egative **T**emperature **C**oefficient*), las **NTC** (Figura 2.25) son resistencias que poseen un coeficiente de temperatura negativo, lo que significa que su valor óhmico disminuye rápidamente cuando aumenta la temperatura.

Figura 2.25. Resistencias NTC.

El valor nominal de la resistencia de estos componentes se especifica habitualmente para una temperatura de 25 °C. En la Figura 2.26 se puede apreciar la dependencia del valor óhmico de una NTC y de una PTC en función de la temperatura.

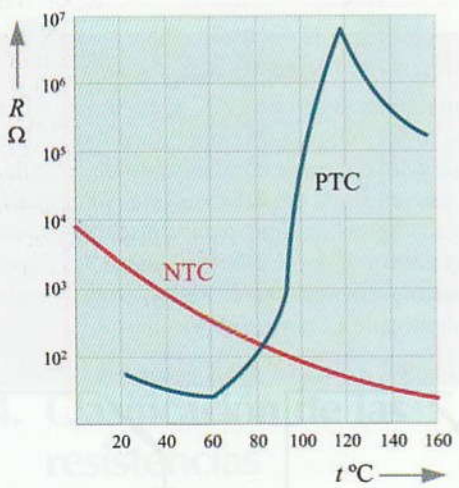


Figura 2.26. Característica de una NTC y de una PTC.

La sensibilidad de las resistencias NTC es bastante más elevada que la de los termómetros y termopares convencionales. Se pueden fabricar resistencias NTC que modifiquen su valor óhmico en varios miles de ohmios por cada grado centígrado de temperatura, por lo que son ideales para la construcción de termómetros de precisión en los que sea importante la medición de pequeñas variaciones de temperatura.

Las aplicaciones prácticas que se hacen de las resistencias NTC son: la construcción de termómetros de resistencia, la compensación térmica de instrumentos de medida, las alarmas, la construcción de sistemas de regulación y control, etc.

Al contrario que las NTC, las **PTC** son resistencias que poseen un coeficiente de temperatura positivo (*PTC*, ***P**ositive **T**emperature **C**oefficient*). Estas resistencias aumentan rápidamente su valor óhmico, al aumentar la temperatura.

Las aplicaciones prácticas de las resistencias PTC son similares a las de las NTC.

2.11.7.2. Resistencias dependientes de la luz (LDR)

Las resistencias LDR (*Light Dependent Resistor*) (Figura 2.27) son componentes que modifican su resistencia eléctrica de acuerdo con la intensidad luminosa que incide sobre su superficie. Esta interesante propiedad es de gran utilidad para la fabricación de dispositivos de control, regulación y medida, que estén relacionados con la luz, como son: regulación automática del contraste y brillo de los televisores en función de la intensidad de la luz de la estancia, medida de la intensidad luminosa para cámaras fotográficas (fotómetros), conexión y desconexión de la iluminación urbana según la intensidad de la luz solar, detectores para alarmas, etc.

Figura 2.27. LDR.

Actividad experimental 2.4

Consigue una resistencia LDR y, mediante el óhmetro, mide su valor óhmico, procurando que no llegue nada de luz a la misma. A continuación, y sin desconectar el aparato de medida, somete a la LDR a intensidades de luz creciente (Figura 2.28). Comprueba cómo el valor óhmico de la resistencia cambia con las diferentes iluminaciones.

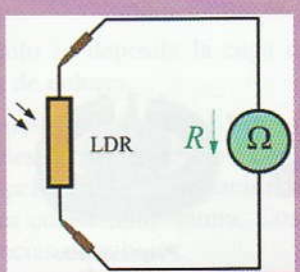


Figura 2.28. La LDR disminuye su resistencia con la intensidad de la luz.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En conclusión, una resistencia LDR posee una resistencia muy elevada en completa oscuridad y su resistencia eléctrica disminuye según se aumenta la intensidad luminosa (lux). En la Figura 2.29, se muestra la curva característica de una LDR.

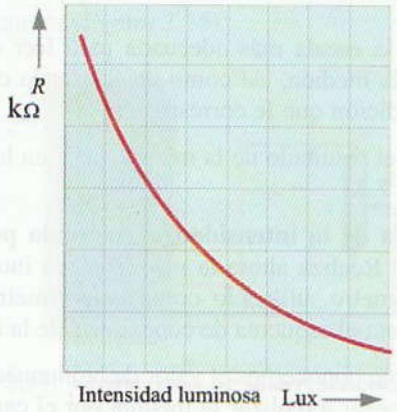


Figura 2.29. **Característica de una LDR.**

2.11.7.3. Resistencias dependientes de la tensión (VDR)

Las resistencias VDR (*Voltage Dependent Resistor*) son componentes que modifican su resistencia eléctrica de acuerdo con la tensión que se aplica entre sus extremos. El valor de la resistencia disminuye, al aumentar la tensión aplicada entre los extremos de la VDR, tal como se puede apreciar en la curva característica de la Figura 2.30.

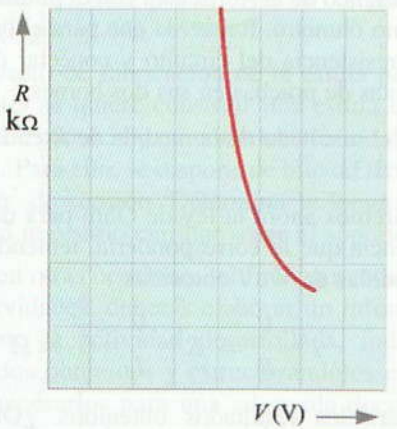


Figura 2.30. **Característica de una VDR.**

Las resistencias VDR se utilizan para la estabilización de tensiones; pueden evitar las chispas que se producen en los contactos de los elementos de accionamiento cuando éstos se abren con cargas inductivas y, con ello, el desgaste irregular que esto produce.

En la Figura 2.31 se muestra el circuito correspondiente a la extinción de arcos en contactos mediante una VDR. Cuando se abre el contacto del interruptor, la bobina desarrolla una fuerza electromotriz elevada debido al fuerte coeficiente de autoinducción que ésta posee; esta elevada tensión provoca un arco entre los contactos que, con el tiempo, se acaban deteriorando; la VDR disminuye su valor óhmico drásticamente cuando se produce esta sobretensión, canalizando la energía producida por la bobina a través de la VDR y evitando así dicho arco.

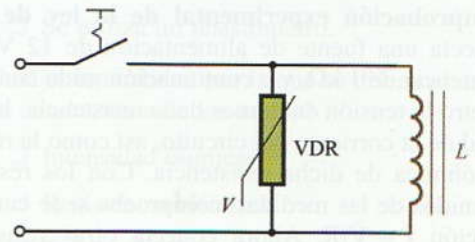


Figura 2.31. **Extinción de arcos mediante VDR.**

2.11.7.4. Magneto resistores (MDR) y bandas extensiométricas

Por último, queda por indicar, que las resistencias MDR o *magneto resistores* son componentes en los que su resistencia depende del valor de la inducción magnética a la que son sometidos. Esto puede tener aplicaciones como: elementos sensibles o detectores de campos magnéticos, detectores de proximidad magnéticos, etc. Así, por ejemplo, la cabeza lectora del disco duro de un ordenador personal está compuesta por un conjunto de elementos con propiedades magnetorresistivas, de tal forma que su resistencia eléctrica depende del campo magnético que las atraviese. Dado que las unidades de información (bits) se almacenan en el disco duro como si de un pequeño imán se tratase, al pasar la cabeza lectora magnetorresistiva por encima de un bit, ésta varía su resistencia y puede enviar la información leída al procesador (Figura 2.32).

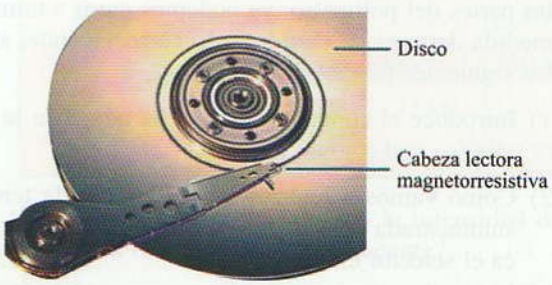


Figura 2.32. **Disco duro para PC con magnetorresistencia.**

Por otro lado, las bandas extensiométricas modifican su valor óhmico en función de las deformaciones y tensiones mecánicas a las que son sometidas.

¿Se te ocurre alguna aplicación práctica más que se pueda llevar a cabo con estas dos últimas resistencias dependientes?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

2.1 Comprobación experimental de la ley de Ohm: Conecta una fuente de alimentación de 12 V a una resistencia de 1 kΩ, y a continuación mide con un polímetro la tensión en bornes de la resistencia, la intensidad de la corriente del circuito, así como la resistencia óhmica de dicha resistencia. Con los resultados obtenidos de las medidas, comprueba si se cumple la relación $I = V/R$. Ahora conecta otras resistencias de diferente valor y compara los resultados (Figura 2.33).

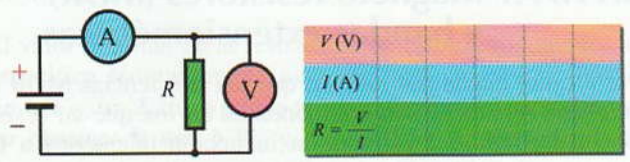


Figura 2.33.

Antes de comenzar a medir con el polímetro, conviene conocer muy bien su manejo, evitando así tomar medidas erróneas o estropear el aparato de medida por una mala conexión.

Manejo del polímetro: Consigue un polímetro, identifica de qué tipo es y cuáles son sus campos de medición.

Una vez que están perfectamente identificadas todas las partes del polímetro, ya podemos pasar a tomar la medida de tensión. Para hacerlo correctamente, sigue los siguientes pasos orientativos:

1) Introduce el conductor de prueba negro en la clavija (–) y el rojo en la (+).

2) Como vamos a realizar la medida con la tensión suministrada por una fuente de alimentación, coloca el selector en C.C.

3) Selecciona el campo de medición más adecuado para la medida que hay que realizar. Como la tensión a que hemos conectado la resistencia es de 12 V, selecciona, por ejemplo entre 0 a 15 V.

4) Sitúa las puntas de prueba en los dos bornes de la resistencia, tal como se indicó en el esquema de conexiones del aparato de medida. En el caso de que el polímetro sea de aguja, ten cuidado en elegir la escala más adecuada para leer el resultado de la medida, así como de aplicar la constante de medición que le corresponda.

Anota el resultado de la medida de V en la tabla de la Figura 2.33.

Medida de la intensidad que circula por la resistencia: Realiza ahora la medida de la intensidad con el polímetro, utilizado como amperímetro, teniendo en cuenta el esquema de conexiones de la Figura 2.33.

Como no conocemos el valor de la intensidad, conviene empezar a realizar la medida por el campo de medición más alto, por ejemplo: 500 mA. En el caso de que no se aprecie la lectura con este rango, se puede seleccionar uno más pequeño. De esta forma, evitaremos una posible avería del mismo. En cualquier caso, todos los polímetros disponen de un fusible de protección rápido que funde y desconecta el circuito en estos casos.

Anota el resultado de la medida de A en la tabla de la Figura 2.33.

Medida del valor óhmico de la resistencia: Mide el valor óhmico de la resistencia con el polímetro, utilizado como óhmetro. Recuerda que para ello debes separar la resistencia del circuito y conectar directamente las puntas de pruebas en sus dos bornes.

Anota el resultado de la medida de R en la tabla de la Figura 2.33

Aplicaremos ahora la ley de Ohm para determinar la resistencia que le correspondería, teniendo en cuenta las medidas de V e I obtenidas:

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \cdots = \Omega$$

Compara los resultados obtenidos. ¿Obtuviste los mismos resultados en los dos casos?

Con los datos obtenidos, calcula la potencia desarrollada por la resistencia.

Ahora, conecta otras resistencias de diferente valor y compara los resultados.

2.2 Identificación de resistencias: Consigue resistencias de todos los tipos y realiza su clasificación. Comprueba su valor óhmico mediante el código de colores y

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

contrasta los resultados, midiendo la resistencia mediante un óhmetro.

2.3 **Resistencias variables:** Consigue diferentes tipos de resistencias variables, potenciómetros y, mediante el óhmetro, comprueba cómo varía su resistencia al mover el cursor (Figura 2.34).

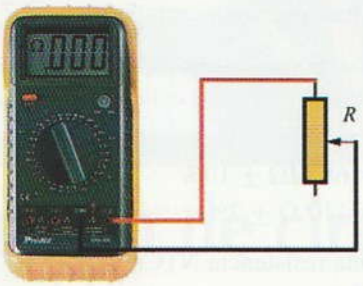


Figura 2.34. **Verificación de una resistencia variable.**

2.4 **Resistencias dependientes:** Consigue diferentes tipos de resistencias dependientes y comprueba con el óhmetro cómo varía su resistencia con la magnitud física de que depende: calor, luz, etc.

2.5 **¿Cómo fabricar una estufa?** En el mercado existen hilos metálicos con un coeficiente de resistividad bastante alto. Por ejemplo, el ferroníquel tiene un coeficiente de resistividad de 0,86 $\Omega \cdot mm^2/m$. Si nosotros enrollamos hilo de este material sobre un soporte aislante (a ser posible un material refractario) y hacemos pasar una corriente por él, éste se calentará intensamente (Figura 2.35).

El proyecto de fabricación de la estufa podría ser el siguiente: se quiere construir una estufa eléctrica de 500 W de potencia para conectar una red de 230 V de tensión. Para ello, se dispone de hilo de ferroníquel de 0,5 mm^2 de sección. Determina la longitud del hilo que será necesario enrollar sobre el soporte aislante.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades, deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

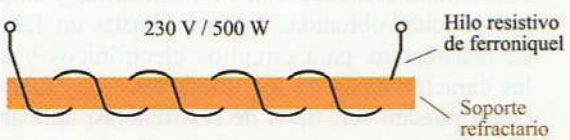


Figura 2.35.

AUTOEVALUACIÓN

2.1 Para medir la resistencia eléctrica:

A ❑ Se conectan los dos terminales del óhmetro con los de la resistencia a medir.

B ❑ Se conectan la resistencia al circuito para posteriormente realizar la medida con el óhmetro.

C ❑ Se utiliza un resistómetro.

2.2 ¿Cuál es la cualidad por la que se diferencian los buenos conductores de los malos?

A ❑ Intensidad óhmica.

B ❑ Resistencia eléctrica.

C ❑ Tensión resistiva.

2.3 Se dispone de una linterna que funciona con una pila de 1,5 V; la lamparita tiene una resistencia de 50 Ω. Calcula su intensidad y potencia.

2.4 Calcula la tensión de funcionamiento de un horno eléctrico que posee una resistencia de 22 Ω, y que al ser conectado, se establece por él una intensidad de 5,7 A.

2.5 ¿Qué resistencia y potencia tiene una plancha eléctrica que consume 2 A conectada a 220 V?

2.6 Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10.

Ejercicio	*I*	*V*	*R*	*P*
1.º	5 A	500 mV	?	?
2.º	20 A	?	5 Ω	?
3.º	30 mA	?	?	5 W
4.º	?	200 V	?	100 mW
5.º	?	10 kV	15 kΩ	?
6.º	?	?	600 mΩ	1 kW

2.7 ¿En qué momento será más alta la intensidad de corriente por una lámpara incandescente?

A ❑ Una vez encendida, ya que es cuando más consume.

B ❑ Justo al cerrar el interruptor, ya que la resistencia del filamento en frío es pequeña y, por tanto, la intensidad de la corriente será más elevada.

C ❑ La intensidad de la corriente es la misma en todo momento.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

2.8 ¿Qué material es necesario utilizar para conseguir que un metro de conductor de 0,5 mm^2 posea una resistencia de 56 mΩ?

A ❑ El cobre.

B ❑ El aluminio.

C ❑ La plata.

2.9 ¿Qué tendrá más resistencia, un conductor de cobre de 100 m de longitud y 6 mm^2 de sección, o uno de aluminio de la misma longitud y de 10 mm^2?

A ❑ El conductor de cobre.

B ❑ El conductor de aluminio.

C ❑ Aproximadamente igual.

2.10 ¿Cuál será la sección de un conductor de cinc de 5 metros, si posee una resistencia de 1 ohmio?

2.11 Se quiere determinar la longitud de un carrete de hilo de cobre esmaltado de 0,25 mm de diámetro. Para ello, se mide con un óhmetro su resistencia, con lo que se obtiene un resultado de 34,6 Ω.

2.12 La resistencia a 20 °C de una bobina de cobre es de 5 ohmios. Calcula su resistencia a 80 °C.

2.13 Una resistencia ha aumentado 1,05 Ω, al incrementar su temperatura de 0 °C a t °C. Determina la resistencia final y la temperatura que alcanzó, si su coeficiente de temperatura es de 0,004 y la resistencia a 0 °C es de 65 Ω.

2.14 Al conectar una lámpara a una toma de corriente de 100 V, se miden por el circuito 750 mA. Determina la potencia de la lámpara y su resistencia.

2.15 ¿A qué tensión habrá que conectar una estufa de 750 W si su resistencia es de 75 Ω? ¿Cuál será la intensidad de la corriente?

2.16 Un calentador de agua presenta en su placa de características los siguientes datos: 3 kW/220 V. Determina: a) la intensidad de la corriente y resistencia; b) la potencia si se conecta ahora a 125 V, considerando que la resistencia permanece constante.

2.17 La placa de una cocina eléctrica indica que consume una potencia de 2,5 kW a la tensión de 220 V. Calcula: a) la intensidad, b) el valor de la resistencia, c) la energía eléctrica que consumirá (en kWh) en un mes, si funciona durante 2 horas al día.

2.18 Para elevar agua de un pozo, se instala una motobomba movida por un motor eléctrico de 3 CV a una red de 380 V. Teniendo en cuenta que 1 CV equivale, aproximadamente, a 735 W, calcula: a) la intensidad de la corriente; b) el gasto cada dos meses si el motor funciona, por término medio, 8 h al día. Precio del kWh: 0,1 €.

2.19 Determina el valor óhmico de las siguientes resistencias que aparecen con los colores:

R_1: (rojo, violeta, naranja, plata)

R_2: (marrón, rojo, naranja, rojo)

R_3: (marrón, verde, gris, oro)

2.20 ¿Qué colores les corresponderían a las siguientes resistencias?

$R_1 = 24\ k\Omega \pm 5\%$

$R_2 = 68\ M\Omega \pm 10\%$

$R_3 = 110\ \Omega \pm 2\%$

2.21 En una resistencia NTC:

A ❑ La resistencia aumenta con la temperatura.

B ❑ La resistencia aumenta con la tensión.

C ❑ La resistencia disminuye con la temperatura.

2.22 En una resistencia LDR:

A ❑ La resistencia aumenta con la luz.

B ❑ La resistencia aumenta con la temperatura.

C ❑ La resistencia disminuye con la luz.

2.23 El valor óhmico de las resistencias MDR varía con:

A ❑ La luz.

B ❑ La temperatura.

C ❑ La inducción magnética.

AMPLIACIÓN

2.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 2*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

2.2 Consulta en www.paraninfo.es los documentos: ***Codificación de resistencias SMD, Series de resistencias normalizadas y comercializadas*** y ***Valores típicos y características de las resistencias fijas***.

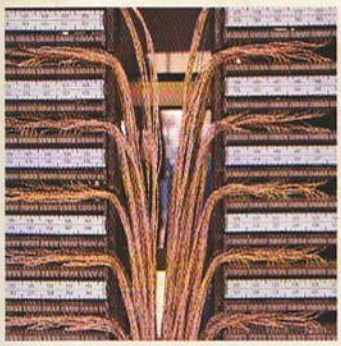
2.3 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, busca un fabricante de resistencias para circuitos electrónicos y analiza las características de los diferentes tipos fabricados, como pueden ser: tipos de resistencias, aplicaciones, dimensiones, potencias, valores óhmicos normalizados, etc.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

3

Resolución de circuitos en corriente continua



El montaje de receptores y generadores en serie y paralelo ocupa un lugar especial dentro de la Electrónica. El cálculo de las magnitudes eléctricas que se dan en los circuitos, como tensión, intensidad, resistencia y potencia, depende de la forma en que están acoplados los receptores.

El cálculo de estas magnitudes nos será de mucha utilidad para seleccionar adecuadamente los componentes electrónicos en un circuito. Además, nos ayudará a evaluar las posibles averías que se den en los mismos.

Contenido

3.1. Acoplamiento de receptores en serie
3.2. Acoplamiento de receptores en paralelo
3.3. Circuitos mixtos
3.4. Conexión de generadores
3.5. Conexión de generadores en serie
3.6. Conexión de generadores en paralelo
3.7. Leyes de Kirchhoff
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Distinguir entre acoplamiento en serie y en paralelo.
- Realizar los cálculos precisos para resolver un circuito eléctrico con varias cargas conectadas entre sí.
- Medir las magnitudes en circuitos en serie, paralelo y mixtos e interpretar y relacionar sus resultados.
- Explicar cualitativamente los fenómenos derivados de una alteración en un elemento de un circuito eléctrico sencillo y describir las variaciones esperables en los valores de tensión y corriente.
- Emplear los agrupamientos de generadores correctamente para conseguir un conjunto de unas determinadas características.
- Realizar los cálculos precisos para resolver un circuito eléctrico con varias cargas o varios generadores conectados entre sí.
- Aplicar las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos con varias mallas en C.C.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

3.1 Acoplamiento de receptores en serie

Acoplar varios receptores en serie consiste en ir conectando sucesivamente el terminal de salida de uno con el de entrada del otro.

En el esquema de la Figura 3.1, se han representado tres resistencias (R_1, R_2, R_3) conectadas en serie. Al cerrar el interruptor, el conjunto de estas tres resistencias quedará sometido a la tensión V del generador, lo que hará que surja una corriente eléctrica I, que se establecerá por todas las resistencias por igual, provocando en cada una de ellas las tensiones V_{AB}, V_{BC} y V_{CD}, respectivamente. De tal manera que la suma de dichas tensiones es igual a la aplicada al conjunto.

$$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$$

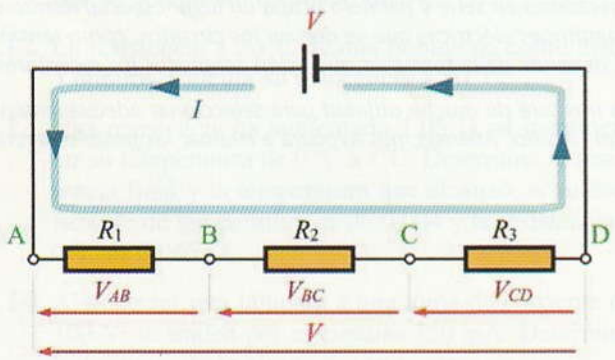


Figura 3.1. **Circuito formado por tres resistencias en serie.**

¿Por qué la intensidad que atraviesa todas las resistencias es la misma?

La corriente eléctrica es un flujo de electrones que, en este caso, se establece por el generador, el conductor y las tres resistencias. Como los electrones no se quedan acumulados en ningún punto del circuito, los mismos que entran por el terminal de una resistencia, salen por otro terminal de ésta, para, a continuación, entrar por el terminal de la siguiente resistencia, y así sucesivamente (Figura 3.2).

¿Por qué se reparte la tensión entre las resistencias?

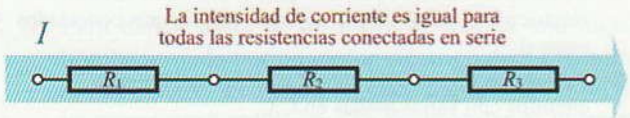


Figura 3.2. **Corriente en un circuito en serie.**

La tensión que aparece entre dos puntos de un circuito surge gracias a la diferencia de cargas que existe entre ellos. Sabemos que esta diferencia de cargas es la que produce la fuerza que impulsa a moverse a los electrones de un punto a otro del circuito. En un circuito en serie la fuerza que provoca la tensión del conjunto irá perdiendo su efecto, al realizar sucesivos trabajos en los receptores conectados en serie, y producirá lo que se conoce como caída de tensión en cada uno de ellos. Lógicamente, cabe pensar que, al ser igual la corriente para todos los receptores, necesitarán más fuerza de impulsión (más tensión) aquéllos que tengan mayor resistencia eléctrica (Figura 3.3).

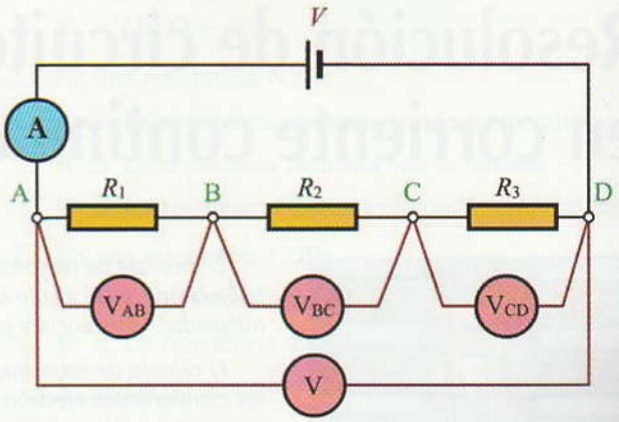


Figura 3.3. **Tensiones en un circuito en serie.**

¿Cómo se calculan estas caídas de tensión?

De la ley de Ohm tenemos que: $V = R \cdot I$

Nota importante: La ley de Ohm siempre se aplica entre dos puntos concretos del circuito. Así, por ejemplo, para determinar el valor de la tensión V_{AB}, habrá que aplicar esta ley entre los puntos A y B. Como entre estos puntos la resistencia es R_1 y la corriente I, tendremos que:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I$$

Por la misma razón:

$$V_{BC} = R_2 \cdot I$$

$$V_{CD} = R_3 \cdot I$$

Por otro lado, como $V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$ y si se sustituyen los valores de V_{AB}, V_{BC} y V_{CD} en esta ecuación, nos queda la siguiente expresión:

$$V = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I$$

operando:

$$V = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$$

despejando I:

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3} \qquad (I)$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Esta expresión nos dice que, para calcular la intensidad que se establece en un circuito de resistencias en serie, basta con dividir la tensión total aplicada al circuito entre la suma de resistencias conectadas en serie.

Resistencia total o equivalente (R_T): Se denomina así a la resistencia que produce los mismos efectos que todo el conjunto de resistencias (Figura 3.4).

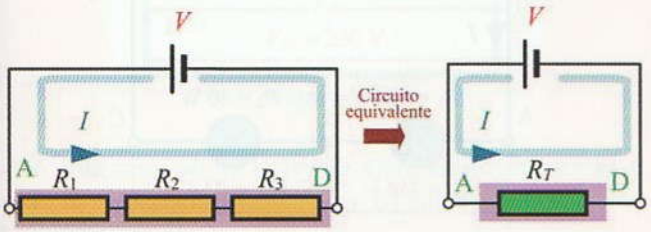


Figura 3.4. **Resistencia total o equivalente.**

En el circuito equivalente se cumple la ley de Ohm, teniendo en cuenta toda la tensión y toda la resistencia:

Luego: $$I = \frac{V}{R_T} \qquad \text{(II)}$$

Si comparamos la expresión (I) y la (II) podemos deducir que la resistencia total o equivalente es igual a la suma de las resistencias de cada uno de los receptores:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Potencia eléctrica de cada receptor: Se aplica la expresión general de potencia eléctrica $P = V \cdot I$, teniendo en cuenta que, al igual que hicimos al aplicar la ley de Ohm, siempre se hace sobre los dos puntos concretos del circuito donde queremos calcular la potencia. De esta forma, tenemos que:

$$P_1 = V_{AB} \cdot I \qquad P_2 = V_{BC} \cdot I \qquad P_3 = V_{CD} \cdot I$$

La potencia total es calculada sumando cada una de las potencias parciales:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

o empleando la expresión de potencia y aplicando la tensión total aplicada:

$$P_T = V \cdot I$$

Actividad resuelta 3.1

Se conectan a una batería de acumuladores de 24 V dos resistencias en serie de 20 Ω y 10 Ω, respectivamente (Figura 3.5). Se quiere determinar: la intensidad que recorre el circuito, la tensión a la que queda sometida cada resistencia, la potencia de cada una de las resistencias y la potencia total del circuito.

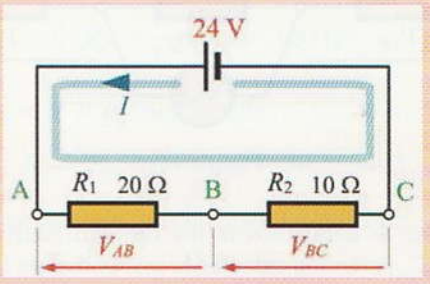


Figura 3.5.

Solución: Primero, calculamos la resistencia total:

$$R_T = R_1 + R_2 + = \cdots = 30\ \Omega$$

La intensidad será entonces:

$$I = \frac{V}{R_T} = \cdots = 0{,}8\ \text{A}$$

La tensión a que queda sometida cada resistencia es:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I = \cdots = 16\ \text{V}$$
$$V_{BC} = \cdots = \cdots = 8\ \text{V}$$

Comprueba la igualdad:

$$V = V_{AB} + V_{BC} = \cdots = 24\ \text{V}$$

La potencia de cada resistencia es:

$$P_1 = V_{AB} \cdot I = \cdots = 12{,}8\ \text{W}$$
$$P_2 = \cdots = \cdots = 6{,}4\ \text{W}$$

La potencia total es:

$$P_T = V \cdot I = 24 \cdot 0{,}8 = 19{,}2\ \text{W}$$

Comprueba la igualdad:

$$P_T = P_1 + P_2 = \cdots = 19{,}2\ \text{W}$$

Actividad resuelta 3.2

En el circuito de la Figura 3.6, la tensión que se ha medido con un voltímetro en la resistencia R_2 es de 100 V. Con estos datos, calcula la intensidad de corriente por el circuito, así como la tensión y potencia de cada una de las resistencias y del conjunto.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

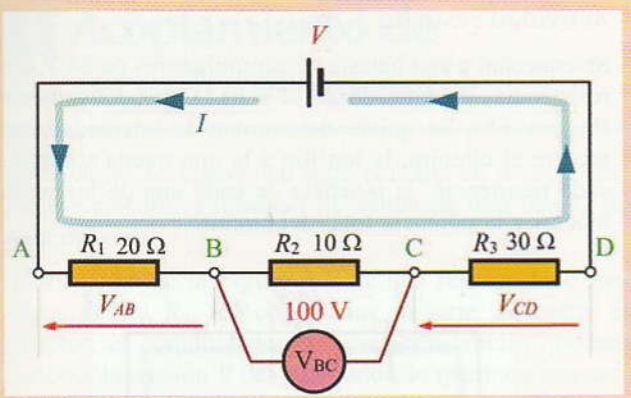


Figura 3.6.

Solución: Si aplicamos la ley de Ohm entre los puntos B y C, podemos calcular la intensidad de la corriente por R_2:

$$I = \frac{V_{BC}}{R_2} = \dots = 10 \text{ A}$$

Como esta intensidad es igual para todas las resistencias conectadas en serie, la tensión a la que queda sometido el resto de las resistencias es:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I = \dots = 200 \text{ V}$$

$$V_{CD} = \dots = \dots = 300 \text{ V}$$

La tensión total del circuito es, entonces:

$$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = \dots = \dots = 600 \text{ V}$$

La potencia de cada resistencia y del conjunto es:

$$P_1 = V_{AB} \cdot I = 200 \cdot 10 = 2.000 \text{ W}$$

$$P_2 = \dots = \dots = 1.000 \text{ W}$$

$$P_3 = \dots = \dots = 3.000 \text{ W}$$

$$P_T = V \cdot I = 600 \cdot 10 = 6.000 \text{ W}$$

Comprueba la igualdad:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \dots = 6.000 \text{ W}$$

Actividad resuelta 3.3

Se desean aprovechar unas lámparas de 115 V/40 W para conectarlas a una red de 230 V. ¿Cuántas lámparas será necesario montar en serie? ¿Qué intensidad recorrerá el circuito? ¿Cuál será la potencia total consumida por el conjunto de las lámparas? ¿Cuál será la resistencia de cada lámpara y la equivalente a su conjunto?

Solución: Como todas las lámparas son iguales y de la misma tensión, el número que hay que conectar en serie será (Figura 3.7):

$$\frac{230 \text{ V}}{115 \text{ V}} = 2 \text{ lámparas}$$

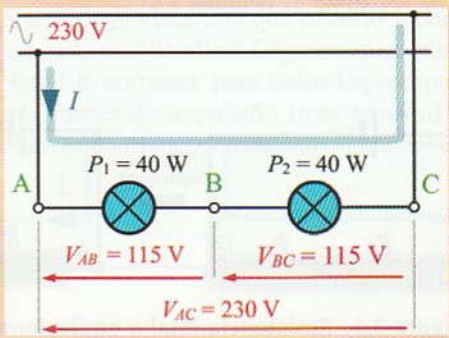


Figura 3.7.

La potencia total será: $P_T = 2 \cdot 40 = 80$ W

La intensidad se puede calcular así: $P_T = V \cdot I$, despejando:

$$I = \frac{P_T}{V} = \frac{80}{230} = 0{,}35 \text{ A}$$

Como todas las lámparas son iguales, sus resistencias también lo serán.

$$R_1 = \frac{V}{I} = \frac{115}{0{,}35} = 328{,}6 \ \Omega$$

$$R_T = 328{,}6 + 328{,}6 = 657{,}2 \ \Omega$$

Actividad resuelta 3.4

Para que una lámpara incandescente de 110 V/40 W no se funda, al conectarla a una red de 230 V, se le conecta una resistencia en serie. Calcula el valor óhmico de esta resistencia, así como su potencia.

Solución: Lo más importante para resolver este tipo de problemas es dibujar un esquema eléctrico donde se puedan ver las diferentes magnitudes del circuito eléctrico, como, por ejemplo, el que se muestra en la Figura 3.8.

Se puede deducir fácilmente que la tensión a que debe quedar la resistencia es $V_{AB} = 230 - 110 = 120$ V.

Aplicando la expresión de la potencia entre los bornes de la lámpara (puntos B y C) determinamos la intensidad del circuito:

$$I = \frac{P_L}{V_{BC}} = \frac{40}{110} = 0{,}36 \text{ A}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

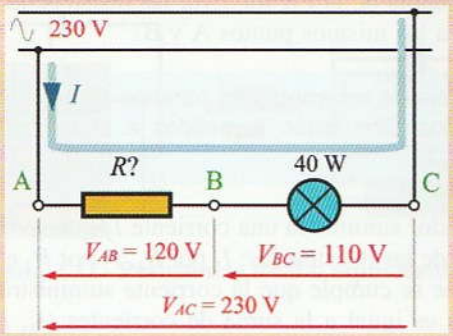


Figura 3.8.

Si aplicamos ahora la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia (puntos A y B) calculamos su valor óhmico.

$$R = \frac{V_{AB}}{I} = \frac{120}{0{,}36} = 333\ \Omega$$

La potencia de esta resistencia es:

$$P = V_{AB} \cdot I = 120 \cdot 0{,}36 = 43{,}2\ \text{W}$$

Es importante tener en cuenta este último dato, ya que nos indica que, a la vez que la resistencia provoca una caída de tensión de 120 V, lo hace a costa de producir un consumo de 43,2 W, que se disipa en forma de calor como una potencia perdida.

Actividad resuelta 3.5

Para regular la intensidad que recorre una lamparita de 30 ohmios de resistencia, se conecta en serie con un potenciómetro. Determina los valores óhmicos que habrá de tener éste para conseguir que la intensidad de corriente esté entre 100 mA y 300 mA, al aplicar al conjunto una tensión de 12 V.

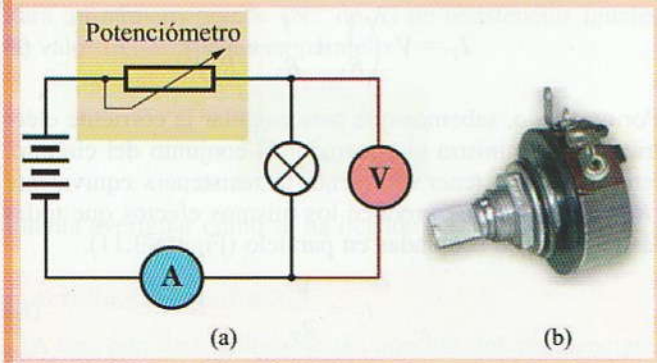


Figura 3.9. (a) Al colocar una resistencia variable en serie con un receptor se consigue regular su intensidad, tensión y potencia. (b) Resistencia variable.

Solución: Calcularemos primero la resistencia total del circuito en serie formado por la resistencia R del receptor y R_p del potenciómetro para que la corriente sea de 100 mA, al aplicar 12 V:

$$I = \frac{V}{R_T}$$

despejando

$$R_T = \frac{V}{I} = \frac{12}{0{,}1} = 120\ \Omega$$

Como $R_T = R + R_p$, despejando

$$R_p = R_T - R = 120 - 30 = 90\ \Omega$$

Para la corriente de 300 mA, tendremos que:

$$R_T = \frac{12}{0{,}3} = 40\ \Omega \qquad R_p = 40 - 30 = 10\ \Omega$$

Por lo que el potenciómetro deberá regular su resistencia entre 10 y 90 Ω.

La tensión y potencia que se dan en el receptor R entre estos dos valores será:

a) Para I = 100 mA

$$V_R = R \cdot I = 30 \cdot 0{,}1 = 3\ \text{V}$$

$$P_R = V_R \cdot I = 3 \cdot 0{,}1 = 0{,}3\ \text{W}$$

b) Para I = 300 mA

$$V_R = R \cdot I = 30 \cdot 0{,}3 = 9\ \text{V}$$

$$P_R = V_R \cdot I = 9 \cdot 0{,}3 = 2{,}7\ \text{W}$$

Por otro lado, al pasar corriente por el potenciómetro éste produce una potencia P_p, que se pierde en forma de calor, y que será:

(a) Para I = 100 mA:

$$P_p = R_p \cdot I^2 = 90 \cdot 0{,}1^2 = 0{,}9\ \text{W}$$

(b) Para I = 300 mA:

$$P_p = R_p \cdot I^2 = 10 \cdot 0{,}3^2 = 0{,}9\ \text{W}$$

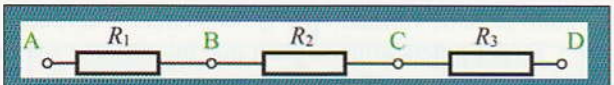
Actividad propuesta 3.1

En la Tabla 3.1 aparecen los datos de seis circuitos diferentes donde se conectan tres resistencias en serie. Averigua las magnitudes desconocidas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tabla 3.1.



Ejercicio	1.º	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º
R_1 (Ω)	100	4	?	?	?	?
R_2 (Ω)	50	6	5	?	100	?
R_3 (Ω)	200	?	?	?	?	10
V_{AB} (V)	?	?	?	?	?	20
V_{BC} (V)	?	?	?	10	10	50
V_{CD} (V)	?	?	?	10	?	?
P_1 (W)	?	?	10	10	5	?
P_2 (W)	?	?	?	?	?	?
P_3 (W)	?	?	?	?	?	?
R_T (Ω)	?	?	?	?	?	?
V_T (V)	250	10	20	?	100	200
I_T (A)	?	0,5	1	10	?	?
P_T (W)	?	?	?	?	?	?

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

3.2 Acoplamiento de receptores en paralelo

Acoplar varios receptores en paralelo (o derivación) es conectar dichos terminales entre sí, tal como se muestra en la Figura 3.10.

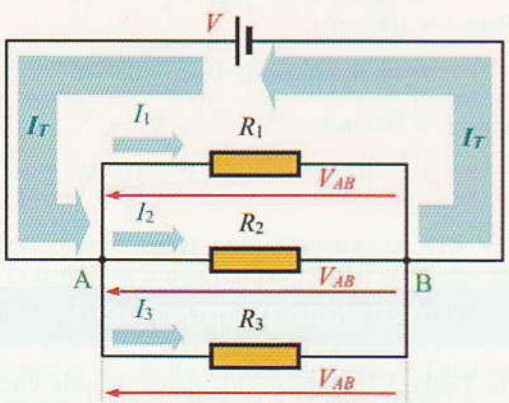


Figura 3.10. Esquema de conexión de tres resistencias acopladas en paralelo.

En el esquema de la Figura 3.10, las resistencias están conectadas a los mismos puntos A y B.

El montaje de receptores en paralelo se caracteriza por que todos ellos están sometidos a la misma tensión ($V = V_{AB}$).

El generador suministra una corriente I_T que se reparte por cada una de las resistencias: I_1 por R_1, I_2 por R_2 e I_3 por R_3, con lo que se cumple que la corriente suministrada al circuito (I_T) es igual a la suma de corrientes (I_1, I_2, I_3) que fluyen por cada uno de los receptores conectados en paralelo.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

La razón de que se cumpla esta expresión es que los electrones que entran en el nudo (A) no quedan acumulados en él, por lo que toda la intensidad I_T que entra al nudo tiene también que salir.

Para calcular las intensidades I_1, I_2 e I_3 basta con aplicar la ley de Ohm entre los puntos A y B y en cada una de las resistencias correspondientes.

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \qquad I_2 = \frac{V}{R_2} \qquad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

¿Cómo se determina la resistencia total o equivalente?

Sabemos que $I_T = I_1 + I_2 + I_3$; sustituyendo en esta expresión los valores de las intensidades parciales por su igualdad, tenemos que:

$$I_T = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

y sacando factor común a V:

$$I_T = V \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \qquad \text{(I)}$$

Por otro lado, sabemos que para calcular la corriente eléctrica que suministra el generador al conjunto del circuito, tendremos que tener en cuenta la resistencia equivalente (R_T), que es la que produce los mismos efectos que todas las resistencias acopladas en paralelo (Figura 3.11).

$$I_T = \frac{V}{R_T} \qquad \text{(II)}$$

si ahora comparamos las expresiones I y II, podemos llegar a la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

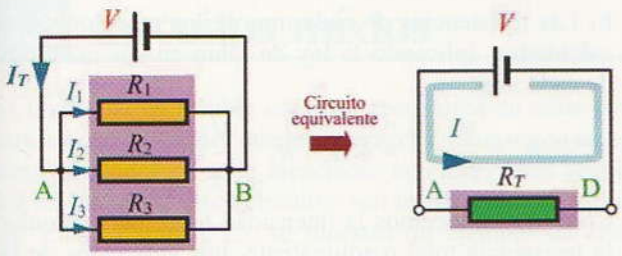


Figura 3.11. Resistencia total o equivalente.

y despejando:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Para un número n de resistencias, la expresión quedaría así:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \cdots \frac{1}{R_n}}$$

Para calcular las potencias, se opera como ya conocemos:

$$P_1 = V \cdot I_1; \quad P_2 = V \cdot I_2; \quad P_3 = V \cdot I_3; \quad P_T = V \cdot I_T$$

o

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

Fórmulas de interés para casos especiales

Para sólo dos resistencias (R_1 y R_2) conectadas en paralelo:

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Para un número grande (N.º de R) de resistencias iguales de valor (R) acopladas en paralelo:

$$R_T = \frac{R}{\text{N.º de } R}$$

Intenta averiguar cómo se ha llegado a estas expresiones.

Actividad resuelta 3.6

A una pila de 9 voltios se le conectan dos resistencias en paralelo de 6 y 2 Ω, respectivamente. Calcula: a) la resistencia total; b) la intensidad de cada resistencia y del conjunto; c) la potencia de cada una, así como la total cedida por la pila (Figura 3.12).

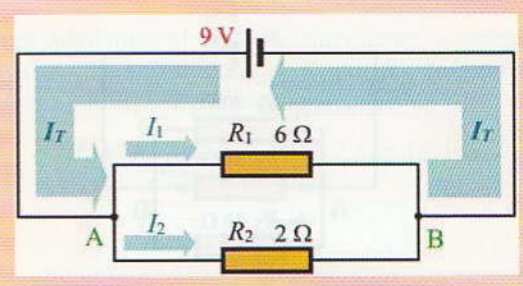


Figura 3.12.

Solución:

a) $$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{2}} = \frac{1}{\frac{1+3}{6}} = \frac{6}{4} = 1{,}5\ \Omega$$

Nota: Para sumar las fracciones 1/6 + 1/2 se las ha reducido al mismo denominador.

Es importante señalar que la resistencia total o equivalente da como resultado un valor inferior a la más pequeña de las resistencias conectadas en paralelo. Este resultado es el esperado, ya que, cuantos más circuitos derivados existan, habrá también más caminos por donde pueda pasar la corriente eléctrica y, por tanto, menos dificultad para el establecimiento de la intensidad total.

b) $$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{9}{6} = 1{,}5\ \text{A}; \quad I_2 = \frac{V}{R_2} = \cdots = 4{,}5\ \text{A}$$

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{9}{1{,}5} = 6\ \text{A}$$

Comprueba si el resultado obtenido, al calcular la intensidad total, es el mismo que el que se obtiene al sumar las intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 = \cdots + \cdots = 6\ \text{A}$$

c) $P_1 = V \cdot I_1 = 9 \cdot 1{,}5 = 13{,}5$ W;

$$P_2 = \cdots = \cdots = 40{,}5\ \text{W}$$

$$P_T = V \cdot I_T = 9 \cdot 6 = 54\ \text{W}$$

Comprueba si se obtiene el mismo resultado, empleando la expresión:

$$P_T = P_1 + P_2 = \cdots + \cdots = 54\ \text{W}$$

Actividad resuelta 3.7

En el circuito de la Figura 3.13, la intensidad de corriente que se ha medido con un amperímetro en la resistencia R_2 es de 2 A. Con estos datos, calcula la intensidad de corriente por el resto de resistencias, así como la tensión y la corriente suministrada por el generador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

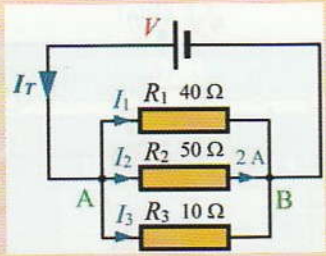


Figura 3.13.

Solución: Si aplicamos la ley de Ohm en la resistencia R_2, podremos calcular la tensión a la que está sometida:

$$V_{AB} = R_2 \cdot I_2 = 50 \cdot 2 = 100 \text{ V}$$

Como esta tensión es la que está aplicada a las demás resistencias que están conectadas en paralelo:

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{100}{40} = 2{,}5 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{V}{R_2} = \cdots = 10 \text{ A}$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = + \cdots = 14{,}5 \text{ A}$$

Actividad resuelta 3.8

Una fuente de alimentación de 6 V alimenta a los siguientes receptores: una lámpara incandescente de 6 W, un receptor de radio de 18 W (Figura 3.9). Calcula: a) la intensidad que absorbe cada receptor de la fuente; b) la resistencia de cada receptor; c) la resistencia total.

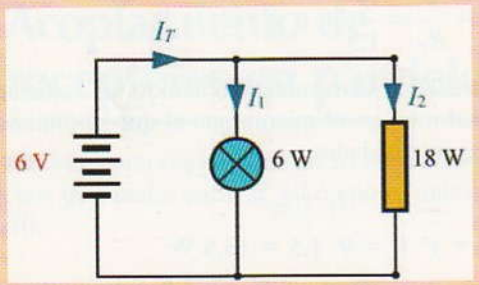


Figura 3.14.

Solución: a) Como todos los receptores están sometidos a la misma tensión, se trata de un montaje en paralelo.

Como conocemos la potencia de cada receptor y la tensión a la que están sometidos, es fácil calcular la intensidad de cada uno.

$$I_1 = \frac{P_1}{V} = \frac{6}{6} = 1 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{P_2}{V} = \cdots = 3 \text{ A}$$

La intensidad total se calcula sumando estas intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 = \cdots + \cdots = 4 \text{ A}$$

b) Las resistencias de cada uno de los receptores son calculadas, aplicando la ley de Ohm en sus extremos de cada uno:

$$R_1 = \frac{V}{I_1} = \frac{6}{1} = 6 \ \Omega; \quad R_2 = \frac{V}{I_2} = \cdots = 2 \ \Omega$$

Como ya conocemos la intensidad total, para calcular la resistencia total o equivalente, nos valdremos de la expresión:

c) $$R_T = \frac{V}{I_T} = \frac{6}{4} = 1{,}5 \ \Omega$$

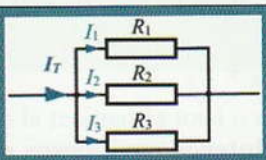
Comprueba el resultado, aplicando la expresión:

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Actividad propuesta 3.2

En la Tabla 3.2, aparecen los datos de cinco circuitos diferentes donde se conectan tres resistencias en paralelo. Averigua las magnitudes desconocidas.

Tabla 3.2.



Ejercicio	1º	2º	3º	4º	5º
R_1 (Ω)	10	4	?	10	?
R_2 (Ω)	30	6	10	?	?
R_3 (Ω)	90	12	?	?	?
I_1 (A)	?	2	4	?	?
I_2 (A)	?	?	?	0,5	2
I_3 (A)	?	?	1	?	1
P_1 (W)	?	?	?	?	?
P_2 (W)	?	?	?	?	?
P_3 (W)	?	?	?	200	?
R_T (Ω)	?	?	?	?	25
V_T (V)	100	?	?	200	?
I_T (A)	?	?	10	?	4

** *La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

3.3 Circuitos mixtos

Al igual que es posible conectar receptores en serie o en paralelo, en ocasiones pueden aparecer circuitos con receptores acoplados en serie mezclados con receptores acoplados en paralelo. Estos circuitos son los denominados mixtos. En la Figura 3.15, se muestra un ejemplo de ellos. Aquí las resistencias R_2 y R_3 están claramente conectadas en paralelo entre sí y, a su vez, su resistencia equivalente se conecta en serie con R_1.

Para resolver este tipo de ejercicios hay que seguir los siguientes pasos:

a) Reducir a su circuito equivalente aquellas partes del circuito que estén claramente acopladas, bien en serie o bien en paralelo.

b) Dibujar sucesivamente los nuevos circuitos equivalentes obtenidos, indicando las magnitudes conocidas y desconocidas.

c) Calcular las magnitudes desconocidas del circuito desde los circuitos equivalentes más reducidos hasta el circuito original.

Actividad resuelta 3.9

Determina las tensiones, potencias e intensidades de cada una de las resistencias del circuito mixto de la Figura 3.15, si aplicamos entre los extremos AC del circuito una tensión de 24,8 V.

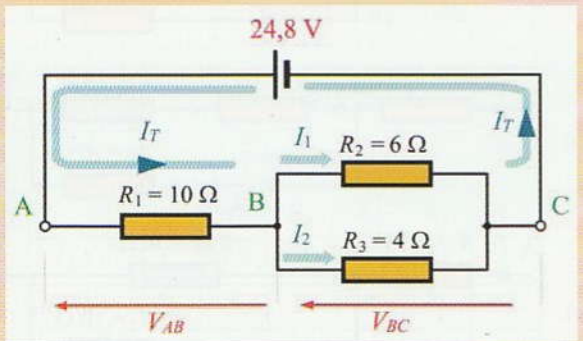


Figura 3.15. **Receptores acoplados en forma mixta.**

Como R_3 y R_2 están claramente conectadas en paralelo determinamos su resistencia equivalente que llamamos R_{23}:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{6 \cdot 4}{6 + 4} = 2{,}4\ \Omega$$

Ahora dibujamos el circuito equivalente al anterior en el que se han sustituido R_2 y R_3 por R_{23} (Figura 3.16). Observa que R_1 y R_{23} están conectadas en serie.

$$R_T = R_1 + R_{23} = 10 + 2{,}4 = 12{,}4\ \Omega$$

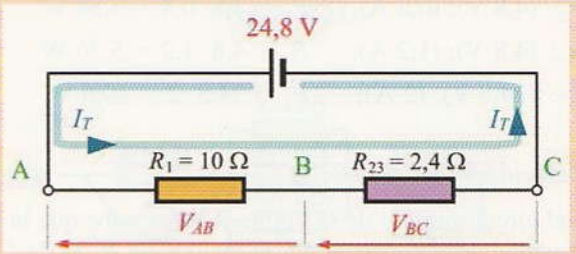


Figura 3.16.

Una vez reducidas todas las resistencias a su equivalente R_T, dibujamos el circuito final de la Figura 3.17 y calculamos con él la intensidad total del circuito.

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{24{,}8}{12{,}4} = 2\ \text{A}$$

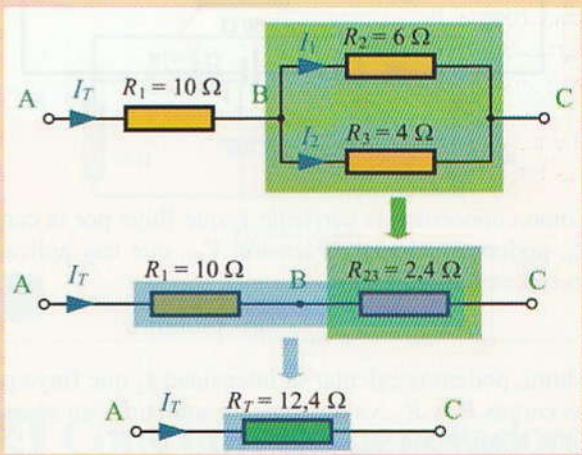


Figura 3.17.

Aplicando la ley de Ohm en el circuito equivalente de la Figura 3.17, obtenemos las tensiones V_{AB} y V_{BC}:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_T = 10 \cdot 2 = 20\ \text{V}$$

$$V_{BC} = R_{23} \cdot I_T = 2{,}4 \cdot 2 = 4{,}8\ \text{V}$$

Una vez obtenidas estas tensiones, podemos calcular las intensidades I_1 e I_2 aplicando la ley de Ohm en el circuito original de la Figura 3.16.

$$I_1 = \frac{V_{BC}}{R_2} = \frac{4{,}8}{6} = 0{,}8\ \text{A}, \quad I_2 = \frac{V_{BC}}{R_3} = \frac{4{,}8}{4} = 1{,}2\ \text{A}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Por último, indicamos la tensión, intensidad y potencia que le corresponde a cada una de las resistencias:

$$P = V \cdot I$$

R_1: (20 V); (2 A); $P_1 = 20 \cdot 2 = 40$ W

R_2: (4,8 V); (0,8 A); $P_2 = 4{,}8 \cdot 0{,}8 = 3{,}84$ W

R_3: (4,8 V); (1,2 A); $P_3 = 4{,}8 \cdot 1{,}2 = 5{,}76$ W

R_T: (24,8 V); (2 A); $P_T = 24{,}8 \cdot 2 = 49{,}6$ W

Actividad resuelta 3.10

Del circuito mixto de la Figura 3.18, se sabe que la intensidad de la corriente por la resistencia R_4 es de 1 A. Calcula la tensión y la corriente suministradas por la fuente de alimentación.

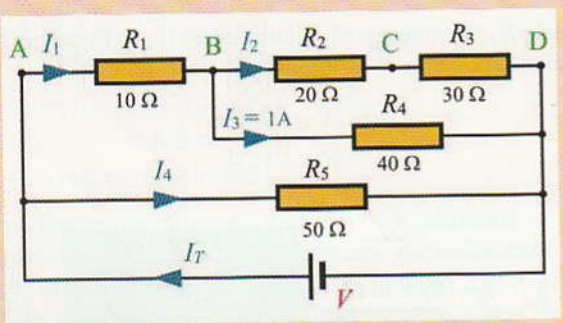


Figura 3.18.

Como conocemos la corriente I_3 que fluye por la carga R_4, podemos calcular la tensión V_{BD} que hay aplicada en sus extremos:

$$V_{BD} = R_4 \cdot I_3 = 40 \cdot 1 = 40 \text{ V}$$

Ahora, podemos calcular la intensidad I_2 que fluye por las cargas R_2 y R_3, ya que quedan sometidas en su conjunto a la tensión V_{BD}:

$$I_2 = \frac{V_{BD}}{R_2 + R_3} = \frac{40}{20 + 30} = 0{,}8 \text{ A}$$

En el nudo B, entra la corriente I_1 y salen las corrientes I_2 e I_3, por lo que se cumple que:

$$I_1 = I_2 + I_3 = 0{,}8 + 1 = 1{,}8 \text{ A}$$

Ahora, ya podemos calcular:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_1 = 10 \cdot 1{,}8 = 18 \text{ V}$$

$$V_{AD} = V_{AB} + V_{BD} = 18 + 40 = 58 \text{ V}$$

$$I_4 = \frac{V_{AD}}{R_5} = \frac{58}{50} = 1{,}16 \text{ A}$$

- La tensión suministrada por la fuente

$$V = V_{AD} = 58 \text{ V}$$

- La corriente suministrada por la fuente

$$I_T = I_1 + I_4 = 1{,}8 + 1{,}16 = 2{,}96 \text{ A}$$

Actividad resuelta 3.11

Determina las tensiones, potencias e intensidades de cada una de las resistencias del circuito mixto de la Figura 3.19, si aplicamos entre los extremos del circuito una tensión de 100 V.

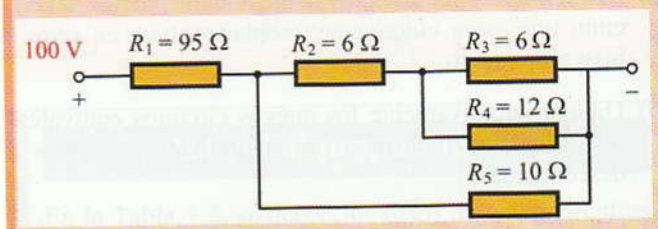


Figura 3.19.

Solución: En la Figura 3.20, se expone cómo se reduce el circuito hasta llegar a la resistencia equivalente

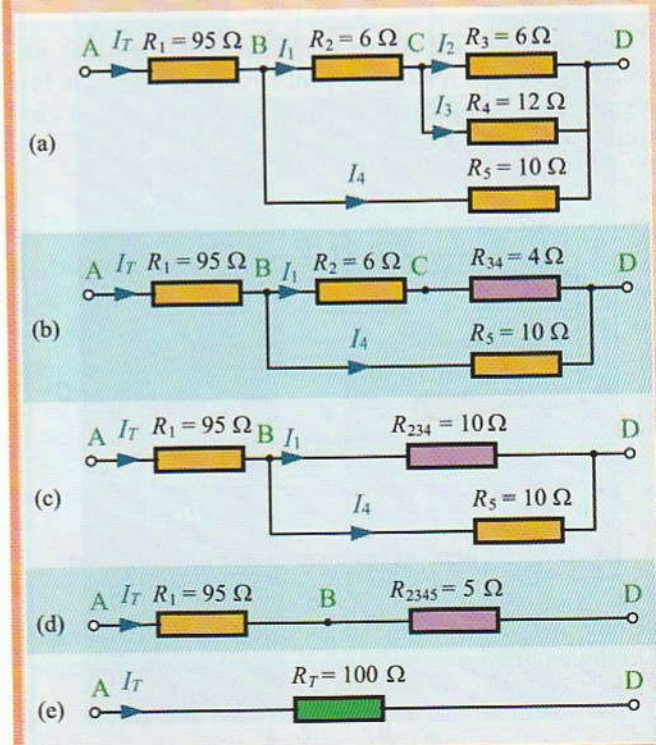


Figura 3.20.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Los cálculos se hacen así:

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot 12}{6 + 12} = 4\ \Omega$$

$$R_{234} = R_2 + R_{34} = 6 + 4 = 10\ \Omega$$

$$R_{2345} = \frac{R_{334} \cdot R_5}{R_{334} + R_5} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5\ \Omega$$

$$R_T = R_1 + R_{2345} = 95 + 5 = 100\ \Omega$$

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{100}{100} = 1\ \text{A}$$

En el circuito de la Figura 3.20(d):

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_T = 95 \cdot 1 = 95\ \text{V}$$

$$V_{BD} = R_{2345} \cdot I_T = 5 \cdot 1 = 5\ \text{V}$$

En el circuito de la Figura 3.20(c):

$$I_1 = \frac{V_{BD}}{R_{234}} = \frac{5}{10} = 0{,}5\ \text{A}, \quad I_4 = \frac{V_{BD}}{R_5} = \frac{5}{10} = 0{,}5\ \text{A}$$

En el circuito de la Figura 3.20(b):

$$V_{BC} = R_2 \cdot I_1 = 6 \cdot 0{,}5 = 3\ \text{V}$$

$$V_{CD} = R_{34} \cdot I_1 = 4 \cdot 0{,}5 = 2\ \text{V}$$

En el circuito de la Figura 3.20(a):

$$I_2 = \frac{V_{CD}}{R_3} = \frac{2}{6} = 0{,}33\ \text{A}, \quad I_3 = \frac{V_{CD}}{R_4} = \frac{2}{12} = 0{,}17\ \text{A}$$

Por último, indicamos la tensión, intensidad y potencia ($P = V \cdot I$) que le corresponde a cada una de las resistencias:

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_T
I (A)	1	0,5	0,33	0,17	0,5	1
V (V)	95	3	2	2	5	100
P (W)	95	1,5	0,66	0,34	2,5	100

Actividad propuesta 3.3

Determina las magnitudes desconocidas (I, V, P) de cada una de las resistencias de los circuitos de las Figuras 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24.

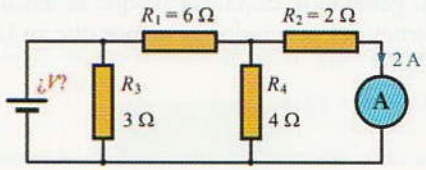


Figura 3.21.

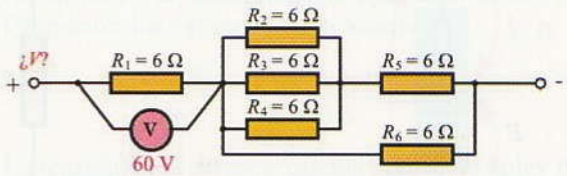


Figura 3.22.

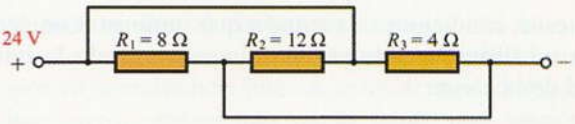


Figura 3.23.

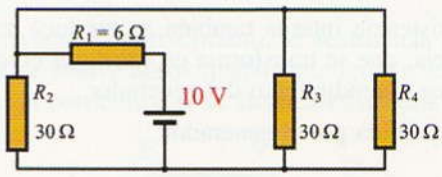


Figura 3.24.

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

3.4 Conexión de generadores

Al igual que con los receptores, las pilas, acumuladores y, en general, cualquier tipo de generador, puede ser conectado en serie, paralelo o mixto. Estos agrupamientos se utilizan cuando se desea aumentar la tensión o la intensidad que suministra un generador.

Antes de analizar el resultado de estas conexiones, vamos a estudiar algunas de las características típicas de un generador.

3.4.1. Tensión en bornes del generador

Cuando el generador suministra corriente al circuito exterior, se produce una cierta caída de tensión en la resistencia

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

interna del generador, de tal forma que la tensión que aparece en bornes del generador es menor que su f.e.m. (Figura 3.25):

$$V_b = E - r_i I$$

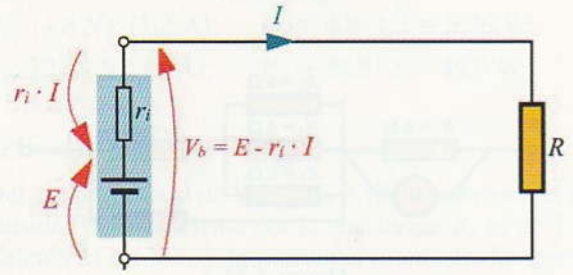


Figura 3.25. Tensión en bornes del generador.

En estas condiciones, la tensión que suministra un generador irá disminuyendo según vaya aumentando la intensidad de la carga.

3.4.2. Potencia del generador

En la resistencia interna también se produce una pérdida de potencia, que se transforma en calor por efecto Joule y que reduce el rendimiento del generador.

Potencia perdida por el generador:

$$P_p = r_i I^2$$

La potencia total que cede el generador al circuito será la suma de la potencia que se pierde en la resistencia interna más la que aparece en la carga. Para calcularla, aplicamos la expresión de la potencia, utilizando la fuerza electromotriz en el primer término (la f.e.m. se corresponde con toda la tensión que proporciona el generador) y la corriente en el segundo.

Potencia total cedida por el generador:

$$P_T = EI$$

$$P_T = P_u + P_p$$

Al receptor se le entrega una potencia que es inferior a la total generada. Esta potencia útil es igual al producto de la tensión en bornes del generador por la corriente.

Potencia útil cedida a la carga:

$$P_u = V_b I$$

Actividad resuelta 3.12

Una batería de acumuladores de automóvil posee una f.e.m. de 12 V y una resistencia interna de 0,2 Ω. Determina la tensión que aparecerá en bornes cuando se le conecte a una carga resistiva de 3 Ω. Haz un balance de las potencias entregadas por el generador.

Solución: Para calcular la intensidad tenemos en cuenta que a la resistencia de la carga se le suma la interna del propio generador:

$$I = \frac{E}{R + r_i} = \frac{12}{3 + 0{,}2} = 3{,}75 \text{ A}$$

$$V_b = E - r_i I = 12 - 0{,}2 \cdot 3{,}75 = 11{,}25 \text{ V}$$

$$P_p = r_i I^2 = 0{,}2 \cdot 3{,}75^2 = 2{,}8 \text{ W}$$

$$P_T = EI = 12 \cdot 3{,}75 = 45 \text{ W}$$

$$P_u = V_b I = 11{,}25 \cdot 3{,}75 = 42{,}2 \text{ W}$$

Comprobaremos si se cumple que:

$$P_T = P_u + P_p = 42{,}2 + 2{,}8 = 45 \text{ W}$$

Actividad resuelta 3.13

En el circuito que se muestra en la Figura 3.26 aparece el sistema de carga de una batería de acumuladores de un automóvil. Averigua la tensión que debe proporcionar la fuente de alimentación (F.A.) para conseguir que la intensidad de carga de la batería sea de 15 A, teniendo en cuenta para ello que su resistencia interna es de 0,2 Ω y que la fuerza electromotriz en el actual estado de carga es de 10 V.

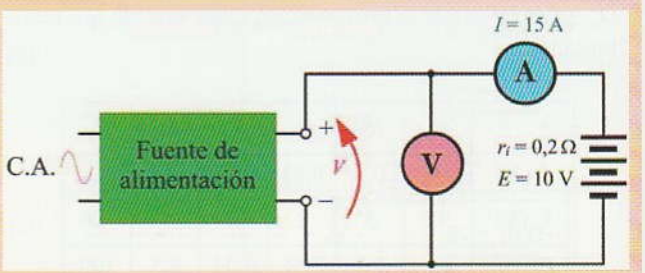


Figura 3.26.

Solución: La tensión (V) que tiene que proporcionar la fuente de alimentación será la suma de la f.e.m. (E) de la batería más la caída de tensión (r_i) que se produce en la resistencia interna

$$V = E + r_i \cdot I = 10 + 0{,}2 \cdot 15 = 13 \text{ V}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

3.5 Conexión de generadores en serie

La conexión de generadores en serie se utiliza cuando queremos aumentar la tensión de salida. Esta forma de conexión es muy utilizada en las baterías de acumuladores, donde se consigue la tensión de salida buscada a base de conectar varios acumuladores en serie.

Esta conexión consiste en agrupar los generadores uno seguido del otro, conectándolos entre sí por sus polos contrarios y dejando dos terminales libres, que constituyen el positivo y negativo del agrupamiento. En la Figura 3.27 se muestra la conexión de tres acumuladores en serie.

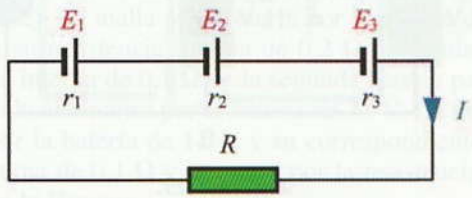


Figura 3.27. **Agrupamiento de generadores en serie.**

En la conexión en serie se cumple que:

- La fuerza electromotriz del conjunto es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de cada uno de los generadores.

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

- La resistencia interna del conjunto es igual a la suma de las resistencias internas de cada uno de los generadores.

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

- La intensidad de la corriente eléctrica es igual en todos los generadores.

Actividad resuelta 3.14

Una batería está compuesta por 6 acumuladores conectados en serie. La f.e.m. de cada acumulador es de 1,5 V y su resistencia interna de 0,1 Ω. Calcula:

a) La corriente y tensión que aparecerá al conectar una carga de 5 Ω de resistencia.

b) La tensión en bornes vacío (sin conectar carga).

c) La intensidad si se cortocircuita la carga (unir eléctricamente mediante un conductor los dos terminales de la batería).

Solución:

$$E = E_1 + E_2 + \cdots + E_6 = 6 \cdot 1{,}5 = 9 \text{ V}$$

$$r = r_1 + r_2 + \cdots + r_6 = 6 \cdot 0{,}1 = 0{,}6\ \Omega$$

El agrupamiento de los acumuladores en serie equivale entonces a uno solo de f.e.m. 9 V y resistencia interna de 0,6 Ω.

a) La corriente la determinamos aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la batería:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{5 + 0{,}6} = 1{,}61 \text{ A}$$

La tensión en la carga se calcula aplicando la ley de Ohm entre sus extremos:

$$V = R \cdot I = 5 \cdot 1{,}61 = 8 \text{ V}$$

b) Cuando se abre el circuito de alimentación, la corriente se interrumpe y, por lo tanto, la caída de tensión en la resistencia interna de los acumuladores se hace cero, apareciendo en la salida una tensión igual a la fuerza electromotriz:

$$V_b = E - rI = 9 - 0{,}6 \cdot 0 = 9 \text{ V}$$

c) Al provocar el cortocircuito, la resistencia del receptor se vuelve aproximadamente igual a cero, por lo que la corriente que se alcanza es igual a:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{0 + 0{,}6} = 15 \text{ A}$$

3.6 Conexión de generadores en paralelo

La conexión de generadores en paralelo se utiliza cuando queremos aumentar la corriente de salida, manteniendo la tensión constante. En la Figura 3.28 se han conectado tres generadores electroquímicos en paralelo.

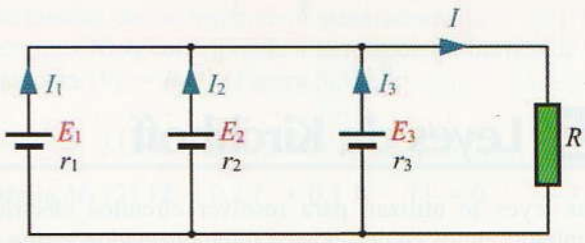


Figura 3.28. **Agrupamiento de generadores en paralelo.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Duoc U.C. BIBLIOTECA Sede Maipú

La conexión en paralelo posee las siguientes características:

- Para que todos los generadores aporten energía deberán poseer la misma f.e.m.
- La f.e.m. equivalente al conjunto es la misma que la de los generadores acoplados.
- Si deseamos que todos los generadores aporten la misma corriente y potencia, además de ser igual su f.e.m., también deberán ser iguales sus resistencias internas.
- La intensidad que suministra el conjunto de generadores es igual a la suma de las intensidades que aporta cada generador.

Actividad resuelta 3.15

Se conectan en paralelo tres generadores de 12 V de f.e.m. y 0,3 Ω de resistencia interna. Determina la intensidad y tensión que aparecerá en los terminales del conjunto, al conectar una resistencia de 4 Ω. ¿Qué corriente aporta cada generador?

Solución: Determinaremos primero la f.e.m. y la resistencia interna equivalente del acoplamiento:

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = 12 \text{ V}$$

Como las resistencias están conectadas en paralelo y son iguales:

$$r = \frac{0{,}3}{3} = 0{,}1\ \Omega$$

De lo que resulta que el acoplamiento en paralelo de los tres generadores equivale a uno solo de 12 V de f.e.m. y 0,1 Ω de resistencia interna.

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{12}{4 + 0{,}1} = 2{,}93 \text{ A}$$

La tensión que aparece en los terminales del conjunto de generadores es:

$$V_b = E - rI = 12 - 0{,}1 \cdot 2{,}93 = 11{,}7 \text{ V}$$

La corriente que suministra cada generador es

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I}{3} = \frac{2{,}93}{3} = 0{,}98 \text{ A}$$

3.7 Leyes de Kirchhoff

Estas leyes se utilizan para resolver circuitos eléctricos complejos, en los cuales existen interconectados varios generadores y receptores.

En el siguiente ejemplo se muestra un circuito de este tipo.

En el circuito de la Figura 3.29 se han conectado en paralelo dos baterías de acumuladores que suministran energía a una lámpara de 10 Ω. La batería n.º 1 produce una f.e.m. $E_1 = 12$ V con una resistencia interna $r_1 = 0{,}2\ \Omega$. En la batería n.º 2, $E_2 = 11$ V, $r_2 = 0{,}1\ \Omega$. Calcula la tensión que aparece en bornes de la lámpara, así como su intensidad y potencia. ¿Qué corriente cede cada una de las baterías? Este problema se puede resolver aplicando adecuadamente las leyes de Kirchhoff.

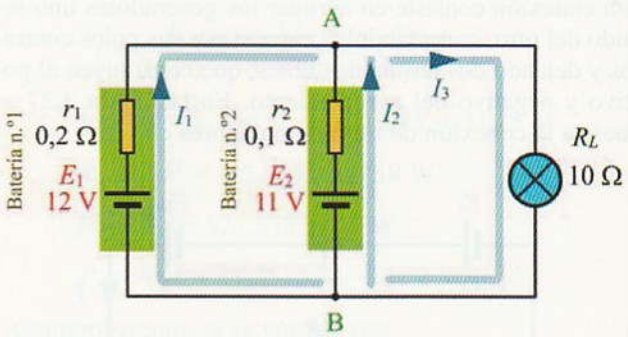


Figura 3.29.

1.ª ley de Kirchhoff

En cierto modo, ya hemos estado aplicando esta ley para la resolución de los circuitos en paralelo. Dice así:

> En todo circuito eléctrico, la suma de las corrientes que se dirigen hacia un nudo es igual a la suma de las intensidades que se alejan de él.

Un **nudo** es cualquier punto de un circuito donde se conectan más de dos conductores. En el ejemplo mostrado en la Figura 3.29 existen el nudo A y el nudo B.

En el nudo A se cumplirá que (Figura 3.30):

$$I_1 + I_2 = I_3$$

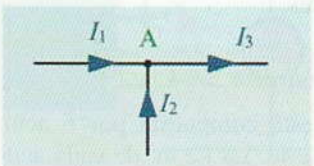


Figura 3.30. **Nudo.**

2.ª ley de Kirchhoff

Esta otra ley también es conocida por todos nosotros, ya que la hemos aplicado en la resolución de circuitos en serie.

En un circuito cerrado, la suma algebraica de las fuerzas electromotrices de los generadores es igual a la suma alge-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

braica de las caídas de tensión en los receptores. Dado que tanto las f.e.m. como las caídas de tensión son, al fin y al cabo, diferencias de potencial, también se podría enunciar esta ley así:

> A lo largo de todo camino cerrado o malla, correspondiente a un circuito eléctrico, la suma algebraica de todas las diferencias de potencial o tensiones es igual a cero.

La única dificultad que encontramos para aplicar, de esta última manera, la 2.ª ley de Kirchhoff es determinar qué diferencias de potencial son de un determinado signo respecto a las otras, y así conseguir igualarlas a cero.

Una **malla** es todo camino cerrado de un circuito eléctrico. En nuestro ejemplo, se pueden apreciar claramente la malla M_1 y la malla M_2. Las hemos representado en el circuito mediante una flecha curvada que nos indica su recorrido (Figura 3.32). La malla M_1 se cierra por la batería de 12 V junto con su resistencia interna de 0,2 Ω, continúa por la resistencia interna de 0,1 Ω de la segunda batería para acabar cerrando el circuito por la batería de 11 V. La malla M_2 lo hace por la batería de 11 V y su correspondiente resistencia interna de 0,1 Ω y se cierra por la resistencia de 10 ohmios de la lámpara.

Antes de aplicar esta segunda ley, conviene establecer una regla de signos que nos indique las polaridades correctas de cada una de las diferencias de potencias que aparecen en cada malla.

Marcamos con una flecha la f.e.m. del generador (la punta de la flecha siempre nos indica el potencial positivo). La intensidad que parte del generador se indica con una flecha (sentido convencional de la corriente) del mismo sentido que la f.e.m. (Figura 3.31).

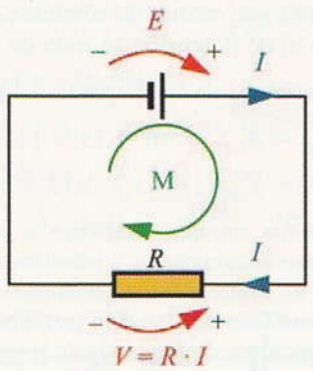


Figura 3.31. Polaridad de las diferencias de potencial en una malla.

Marcamos con otra flecha la caída de tensión en el receptor ($V = RI$); para que el terminal positivo de esta caída de tensión quede situado en la punta de la flecha, su sentido será siempre contrario al de la intensidad que recorre.

Si ahora aplicamos la 2.ª ley de Kirchhoff a la malla formada, según el sentido marcado en la Figura 3.31, tendremos que la fuerza electromotriz E se manifiesta en el mismo sentido que la malla M, luego será positiva; la caída de tensión RI se manifiesta en sentido contrario al de la malla, luego será negativa. De esta forma, tendremos la siguiente ecuación:

$$E - RI = 0$$

Que nos indica que, efectivamente: $E = RI$.

¿Cómo se aplican las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos?

a) Se fija provisionalmente el sentido de las intensidades de corriente por cada una de las ramas del circuito (una vez resuelto el sistema de ecuaciones planteado, se conocerá su verdadero sentido), partiendo del principio de que los generadores proporcionan corriente por su terminal positivo (sentido de corriente convencional).

b) La aplicación de la segunda ley requiere fijar previamente y de forma arbitraria, un sentido para recorrer cada una de las mallas. Las f.e.m. y las caídas de tensión se consideran positivas, si la flecha que indica su sentido coincide con el marcado por nosotros en la malla, y negativa en el caso contrario.

c) Se aplicará la 1.ª ley a todos los nudos del circuito excepto a uno (esto se hace para no escribir ecuaciones repetidas).

d) Se aplica la 2.ª ley a tantas mallas o circuitos cerrados como sea necesario para disponer de un sistema de tantas ecuaciones como incógnitas.

Actividad resuelta 3.16

Resolveremos ahora el ejemplo presentado al inicio en la Figura 3.29.

En un principio, se ha supuesto que las intensidades I_1 e I_2 parten de los generadores hacia la lámpara (según el sentido convencional) donde se juntan y forman I_3. Los términos 0,2 I_1 y 0,1 I_2 corresponden a las caídas de tensión de los respectivos generadores ($u = r_i I$). El término 10 I_3 corresponde a la tensión en bornes de la lámpara ($V_L = R \cdot I$) (Figura 3.32).

Nudo A (1) $I_1 + I_2 = I_3$

Malla M_1 (2) $12 - 0{,}2\, I_1 + 0{,}1\, I_2 - 11 = 0$

Malla M_2 (3) $11 - 0{,}1\, I_2 - 10\, I_3 = 0$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

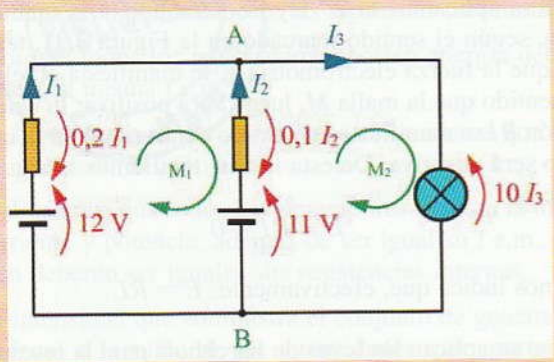


Figura 3.32.

Al recorrer la malla M_1, la caída de tensión 0,2 I_1 y los 11 V del generador n.º 2 quedan en sentido contrario a los 12 V del generador n.º 1 y a la caída de tensión 0,1 I_2 (Figura 3.33).

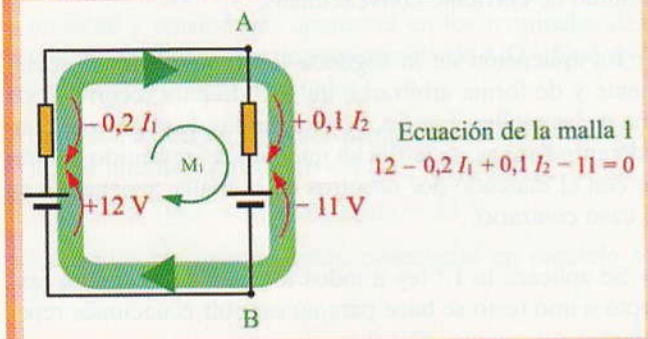


Figura 3.33.

Al recorrer la malla M_2, la caída de tensión 0,1 I_2 y la tensión en bornes de la lámpara 10 I_3 quedan en sentido contrario a los 11 V del generador n.º 2 (Figura 3.34).

Ahora sólo nos queda resolver el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (I_1, I_2 e I_3). Para ello, nos valemos de cualquiera de los métodos conocidos: reducción, sustitución e igualación. En nuestro caso sustituiremos los términos de la ecuación (1) en la ecuación (3). De esta forma eliminamos una ecuación y una incógnita:

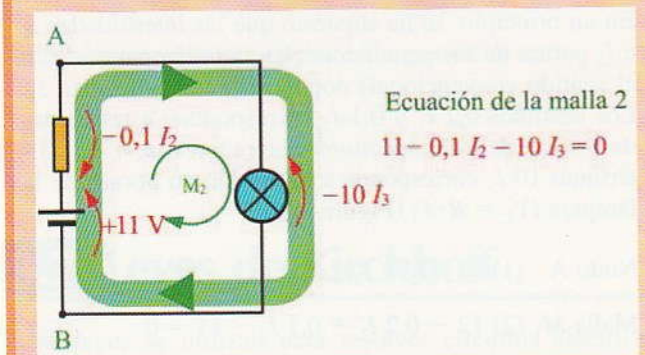


Figura 3.34.

(3) $11 - 0{,}1\ I_2 - 10\ (I_1 + I_2) = 0$, simplificando:

(3) $11 - 10\ I_1 - 10{,}1\ I_2 = 0$, y con la ecuación n.º 2:

(2) $1 - 0{,}2\ I_1 + 0{,}1\ I_2 = 0$

Al multiplicar la ecuación (2) por 101 y sumar este resultado a la ecuación (3) se elimina I_2:

(3) $11 - 10\ I_1 - 10{,}1\ I_2 = 0$

(2) $101 - 2\ 0{,}2\ I_1 + 10{,}1\ I_2 = 0$

$$112 - 30{,}2\ I_1 = 0$$

de donde: $I_1 = \dfrac{112}{30{,}2} = 3{,}71$ A

Se sustituye este resultado en la ecuación (2), y se tiene:

$$1 - 0{,}2\ (3{,}71) + 0{,}1\ I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{0{,}2\ (3{,}71) - 1}{0{,}1} = -2{,}58 \text{ A}$$

y en la ecuación (1) obtenemos:

$$I_3 = 3{,}71 - 2{,}58 = 1{,}13 \text{ A}$$

Que la corriente I_2 haya salido negativa nos indica que la batería de acumuladores n.º 2 no está aportando energía a la lámpara. Por el contrario, está tomando 2,58 A de la batería n.º 1. En este caso, esta corriente sirve para cargar los acumuladores de la n.º 2.

La batería n.º 1 aporta 1,13 A a la lámpara y 2,58 A a la batería n.º 2 que se comporta como si fuese un receptor (recuerda que cuando la corriente queda en sentido contrario al de la tensión se trata de un receptor).

La tensión en bornes de la lámpara y su potencia es:

$$V_{AB} = R_L\ I_3 = 10 \cdot 1{,}13 = 11{,}3 \text{ V}$$

$$P_1 = V_{AB}\ I_3 = 11{,}3 \cdot 1{,}13 = 12{,}8 \text{ W}$$

Nota: Los sistemas con tres ecuaciones se pueden resolver también mediante determinantes y calculando las incógnitas por el sistema de Cramer. En la actualidad existen muchas calculadoras científicas que también permiten resolver estos sistemas de ecuaciones de forma rápida y sencilla. Además, con la ayuda de una hoja de Microsoft Excel en combinación con el sistema de resolución por determinantes (función MDETERM) podremos realizar estas operaciones en muy poco tiempo.

En relación con esta última nota, en www.paraninfo.es se han incluido los siguientes documentos:

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

a) Cómo resolver un sistema de ecuaciones mediante determinantes por el método de Cramer.

b) Cómo resolver el sistema de ecuaciones de la Actividad resuelta 3.16 con la ayuda de una hoja de Microsoft Excel y determinantes.

Actividad resuelta 3.17

Se conectan en serie tres baterías de acumuladores, tal como se muestra en el circuito de la Figura 3.35, para alimentar un horno de 5 Ω de resistencia. Determina la tensión en bornes del horno, así como su tensión y potencia.

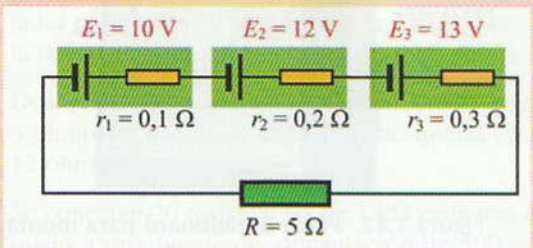


Figura 3.35.

Solución: Primero marcamos el sentido de la corriente eléctrica y el de las diferentes tensiones del circuito (Figura 3.36). Como no hay más que una malla, la ecuación se compone aplicando la 2.ª ley de Kirchhoff:

$$10 - 0{,}1\,I + 12 - 0{,}2\,I + 13 - 0{,}3\,I - 5\,I = 0$$

Agrupando términos:

$$(10 + 12 + 13) - I(0{,}1 + 0{,}2 + 0{,}3 + 5) = 0$$

y despejando, tenemos que: $I = \dfrac{35}{5{,}6} = 6{,}25$ A

Tensión en bornes del horno:

$$V = RI = 5 \cdot 6{,}25 = 31{,}25 \text{ V}$$

Potencia del horno:

$$P = VI = 31{,}25 \cdot 6{,}25 = 195 \text{ W}$$

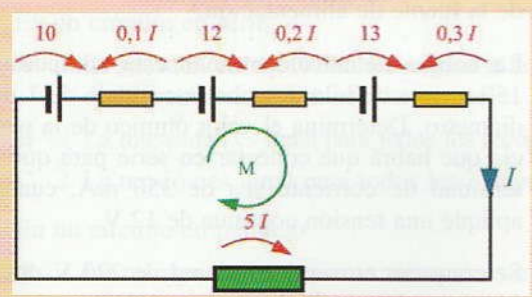


Figura 3.36.

Actividad propuesta 3.4

Determina las corrientes por cada una de las ramas de los circuitos de las Figuras 3.37, 3.38 y 3.39.

a)

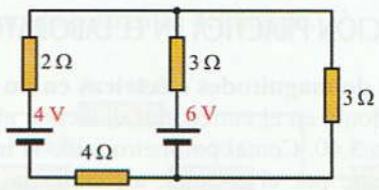


Figura 3.37.

b)

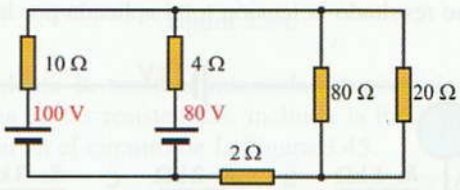


Figura 3.38.

c)

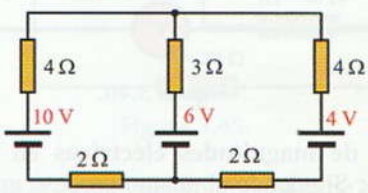


Figura 3.39.

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

3.1 Medida de magnitudes eléctricas en un circuito en serie: Monta en el entrenador didáctico el circuito de la Figura 3.40. Con el polímetro mide la intensidad de la corriente por el circuito, así como la tensión que aparece en cada una de las resistencias y la que proporciona la fuente de alimentación. Comprueba que la suma de las tensiones de cada una de las resistencias da como resultado la tensión total aplicada por la fuente.

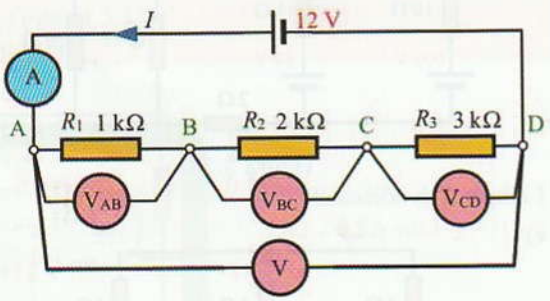


Figura 3.40.

3.2 Medida de magnitudes eléctricas en un circuito paralelo: Siguiendo el mismo proceso que en la actividad anterior, monta el circuito de la Figura 3.41, mide la tensión y la corriente de cada una de las resistencias. Comprueba que la corriente que suministra la fuente se corresponde con la suma de las corrientes de cada resistencia.

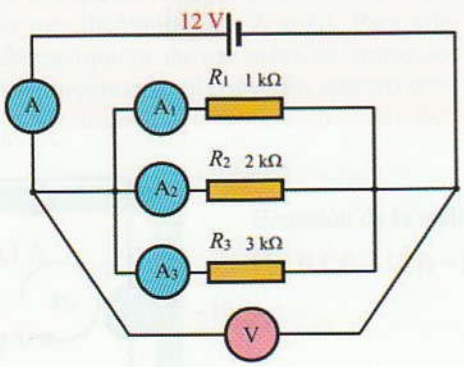


Figura 3.41.

3.3 Análisis de circuitos de C.C. Monta una placa de montaje rápido (tipo placa Breadboard como la de la Figura 3.42) un circuito donde aparezcan dos pilas y varias resistencias interconectadas, similar a las que hemos tomado como ejemplo para el estudio de las leyes de Kirchhoff. Calcula de forma teórica las diferentes tensiones y corrientes del circuito, para luego comprobarlas mediante un voltímetro y un amperímetro de una forma práctica en el circuito montado.

Figura 3.42. **Placa Breadboard para montaje rápido de circuitos.**

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

AUTOEVALUACIÓN

3.1 Se conectan en serie tres resistencias de 200, 140 y 100 Ω a una red de 220 V. Determina la intensidad, tensiones y potencias de cada una, así como la potencia y resistencia total.

3.2 Se conectan tres resistencias en serie de 10, 5 y 6 Ω a una fuente de alimentación. La caída de tensión en la resistencia de 5 Ω es de 5 V. ¿Cuál es la tensión de la fuente de alimentación?

3.3 La bobina de un electroimán está compuesta por 150 metros de hilo de cobre esmaltado de 1 mm de diámetro. Determina el valor óhmico de la resistencia que habrá que conectar en serie para que la intensidad de corriente sea de 350 mA, cuando se aplique una tensión continua de 12 V.

3.4 Se conectan en serie a una red de 220 V dos calefactores eléctricos de características: número 1: 500 W/220 V, número 2: 750 W/220 V. Determina

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

la resistencia total y de cada uno de ellos, la corriente del circuito, así como la tensión y potencia de funcionamiento de cada uno de ellos.

3.5 Calcula las características que debe tener la resistencia que hay que conectar en serie a un receptor resistivo de características 9 V/10 W para poder conectarlo a una batería de 24 V sin que sufra daños.

3.6 Se conectan tres lámparas en paralelo de resistencias 6, 4 y 12 Ω a una batería de automóvil de 12 V. Calcula: a) la resistencia y potencia total, b) las corrientes parciales y la corriente total.

3.7 Una instalación consta de cuatro lámparas, de potencias 25, 40, 60 y 100 W respectivamente, conectadas en paralelo y alimentadas a 220 V. Determina la resistencia total y la intensidad total del circuito.

3.8 Dos resistencias en paralelo dan como resultado 3 ohmios. Determina una sabiendo que la otra vale 12 ohmios.

3.9 Se conectan 20 resistencias de 1 kΩ cada una en paralelo a una fuente de alimentación de 500 voltios. Averigua: a) la resistencia equivalente, b) la intensidad por cada resistencia e intensidad total, c) la potencia de cada resistencia y la potencia total.

3.10 Para poder graduar la potencia de trabajo de un calefactor eléctrico, se han conectado tres resistencias con un conmutador de tres posiciones, tal como se indica en la Figura 3.43. La tensión de alimentación es de 220 V. Averigua el valor óhmico de cada una de las resistencias para que las potencias en cada uno de los puntos de dicho conmutador sean las siguientes: punto (1) 1.000 W, punto (2) 2.000 W y punto (3) 3.000 W.

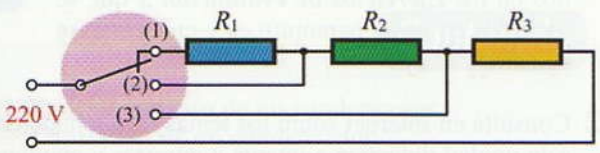


Figura 3.43.

3.11 En un circuito en serie:

A ❑ La resistencia equivalente es igual a la suma de las resistencias conectadas en serie.

B ❑ La intensidad es igual para todos los receptores.

C ❑ La tensión es igual para todos los receptores.

3.12 En un circuito en paralelo:

A ❑ La resistencia equivalente siempre es inferior a la de cualquier resistencia conectada en paralelo.

B ❑ La intensidad es igual para todos los receptores.

C ❑ La tensión es igual para todos los receptores.

3.13 Calcula la resistencia equivalente al circuito de la Figura 3.44, así como la corriente y potencia que cedería una fuente de alimentación de 200 V conectada entre los extremos del mismo.

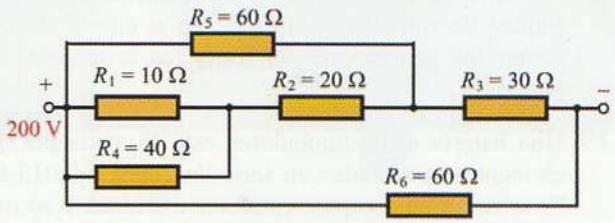


Figura 3.44.

3.14 Calcula la tensión, intensidad y potencia de cada una de las resistencias, incluida la total, que aparecen en el circuito de la Figura 3.45.

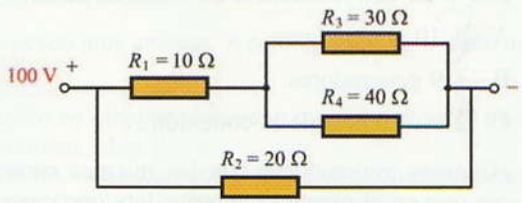


Figura 3.45.

3.15 Calcula la tensión del voltímetro V de la Figura 3.46.

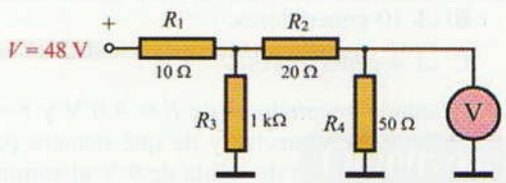


Figura 3.46.

3.16 Calcula la tensión e intensidad de cada una de las resistencias, incluida la total, que aparecen en el circuito de la Figura 3.47, si se sabe que la corriente por R_2 = 100 mA.

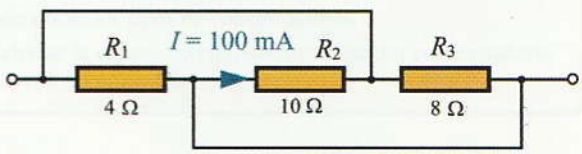


Figura 3.47.

3.17 Se conectan en serie 10 generadores de C.C. de características iguales, siendo la f.e.m. de cada uno

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

2 V y su resistencia interna de 0,12 Ω. Calcula: a) la tensión en bornes en vacío, b) la tensión y corriente si se conecta una carga de 8 ohmios, c) el rendimiento eléctrico del conjunto de generadores para dicha carga, d) la corriente del cortocircuito, e) la tensión en bornes del conjunto cuando suministra una corriente de 2 amperios.

3.18 Resuelve las mismas cuestiones planteadas en la actividad de autoevaluación anterior si en vez de conectar los generadores en serie, los acoplamos en paralelo.

3.19 Una batería de acumuladores está formada por 10 elementos conectados en serie de 2,5 V y 0,015 Ω. Se conecta un receptor entre sus extremos y se miden 17,5 V. Determina: a) la intensidad, la resistencia y la potencia de la carga, b) la potencia útil cedida por cada generador.

3.20 ¿Cuántos generadores de $E = 24$ V y $r = 0{,}2$ Ω hay que conectar en serie para conseguir una tensión de 220 V en una resistencia de carga de 22 Ω?

A ❑ 10 generadores.

B ❑ 9 generadores.

C ❑ No es posible la conexión.

3.21 ¿Cuántos generadores con las mismas características que en el ejercicio anterior hay que conectar en paralelo para conseguir que la resistencia de carga de 0,22 Ω conectada a sus extremos trabaje a 22 V?

A ❑ 5 generadores.

B ❑ 10 generadores.

C ❑ 4 generadores.

3.22 ¿Cuántos generadores de $E = 4{,}6$ V y $r = 0{,}1$ Ω se tendrán que conectar y de qué manera para conseguir una tensión de salida de 9 V al suministrar 3 A a una carga?

A ❑ 4 generadores conectados en circuito mixto: dos ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie.

B ❑ 2 generadores conectados en serie.

C ❑ 6 generadores conectados en circuito mixto: tres ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie.

3.23 Determina las corrientes que fluyen por el circuito de la Figura 3.48.

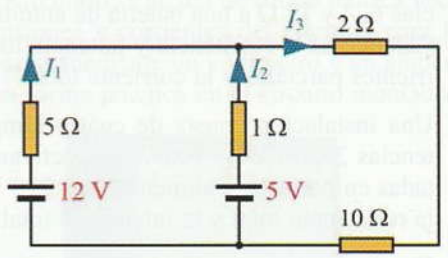


Figura 3.48.

3.24 Averigua la tensión que aparece en la carga de 8 Ω del circuito de la Figura 3.49.

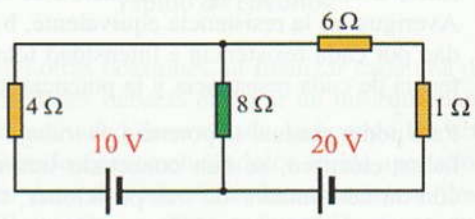


Figura 3.49.

AMPLIACIÓN

3.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 3*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

3.2 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

4

Los condensadores

El condensador es un dispositivo muy utilizado en la electricidad, sobre todo, en aplicaciones de circuitos electrónicos. Pero, ¿qué función cumple el condensador en un circuito? Se puede decir que un condensador es un elemento capaz de almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica para devolverla cuando sea necesaria.

Las aplicaciones de los condensadores son muy amplias. A continuación, se indican algunas de ellas:

- *Aprovechando el tiempo que tardan en cargarse se pueden construir circuitos de acción retardada (temporizadores electrónicos, etc.).*
- *Como ya estudiaremos más adelante, se utilizan como filtros en los rectificadores (dispositivos que convierten la C.A. en C.C.). Con ellos se consigue que la tensión obtenida sea más continua.*
- *Realización de los circuitos llamados oscilantes y del fenómeno de resonancia. Sintonía en radiodifusión.*
- *Supresión de parásitos en radiodifusión (ruidos que producen los motores de explosión de los automóviles).*
- *Corrección del factor de potencia en los sistemas de corriente alterna.*

Contenido

4.1. Funcionamiento de un condensador
4.2. Capacidad de un condensador
4.3. Carga de un condensador
4.4. Descarga de un condensador
4.5. Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador
4.6. Especificaciones técnicas de los ordenadores
4.7. Tipos de condensadores
4.8. Identificación de los valores de los condensadores
4.9. Asociación de condensadores
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Describir el funcionamiento y la función de los condensadores.
- Evaluar los procesos de carga y descarga de un condensador.
- Seleccionar adecuadamente las magnitudes de un condensador.
- Reconocer los tipos de condensadores.
- Calcular la capacidad equivalente al asociar condensadores en serie y en paralelo.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

4.1 Funcionamiento de un condensador

Actividad experimental 4.1

Toma una pila de 9 V y conéctala a un condensador electrolítico de 2.200 μF (microfaradios) o más, teniendo cuidado de no equivocarte con las conexiones de los polos (Figura 4.1).

Seguidamente, separa el condensador de la pila y mide la tensión entre sus terminales. Podrás comprobar que el voltímetro indica una tensión de 9 V.

A continuación, conecta el condensador a los terminales de un diodo Led (diodos que emiten una pequeña radiación luminosa cuando son recorridos por una pequeña intensidad de corriente eléctrica), cuidando de respetar las polaridades. Podrás comprobar que el Led se enciende durante un instante.

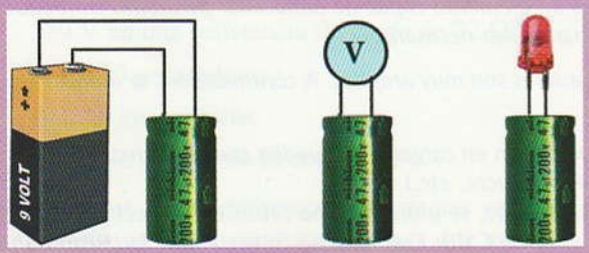


Figura 4.1.

La primera parte de la Actividad experimental 4.1 demuestra que, al conectar la pila con el condensador, éste se carga de energía eléctrica y que la tensión con que ha sido cargado dicho condensador coincide con la tensión de la pila. La segunda parte de esta experiencia hace patente la descarga del condensador a través del diodo Led que se enciende durante el pequeño instante que dura la descarga.

Para construir un condensador basta con montar dos placas metálicas conductoras separadas por un material aislante, denominado dieléctrico, como el aire, papel, cerámica, mica, plástico, etc. (Figura 4.2).

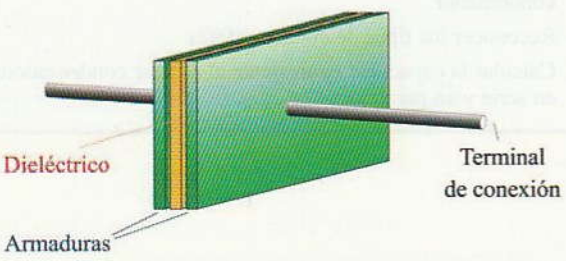


Figura 4.2. Constitución de un condensador.

Normalmente, este dieléctrico se dispone en forma de lámina muy fina para conseguir que las placas metálicas, denominadas armaduras, se encuentren lo más próximas unas de otras.

El condensador se carga de electricidad, según los siguientes fundamentos. Si conectamos las armaduras de un condensador como se indica en el circuito de la Figura 4.3, los electrones en exceso del polo negativo de la pila se dirigirán a la armadura A, cargándola negativamente. A su vez, en la parte interna de la armadura B se producirá una acumulación de cargas positivas por inducción electrostática (recuerda que las placas están muy próximas y que, por tanto, existe una gran atracción entre las cargas eléctricas de ambas armaduras debido a la acción del campo eléctrico). Por otro lado, la carga negativa acumulada en la parte externa de la armadura B es atraída por el polo positivo de la pila, lo que completa la carga del condensador. Una vez que esto suceda, ya no habrá más movimiento de electrones, a no ser que se aumente la tensión de la pila.

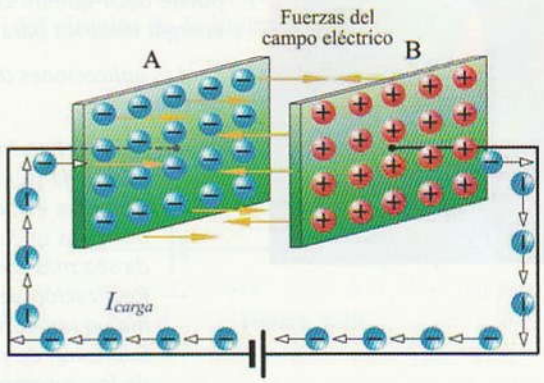


Figura 4.3. Carga de un condensador.

Una vez cargado el condensador, si se le desconecta de la fuente de energía eléctrica, la acumulación de cargas se mantiene gracias a que sigue existiendo la fuerza de atracción entre las armaduras cargadas debido a la diferencia de cargas (Figura 4.4).

¿Qué ocurriría si una vez cargado el condensador le aplicásemos una tensión mayor? Al aumentar la tensión aplicada, aumentan las fuerzas de atracción entre las cargas de

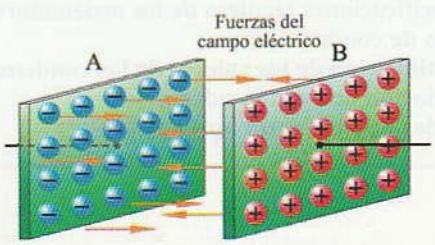


Figura 4.4. Condensador cargado.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

las armaduras y, por tanto, aparece una nueva corriente, que carga el condensador hasta alcanzar la nueva tensión aplicada.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente continua? Sólo existe corriente eléctrica mientras se carga el condensador, por lo que una vez que se termina la carga se interrumpe el circuito. Por tanto, se puede decir que un condensador no deja pasar la corriente continua.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente alterna? El condensador se carga mientras aumenta la tensión entre sus placas y se descarga cuando la tensión acumulada es superior a la aplicada. Con lo cual en C.A. el condensador se carga y descarga en cada mitad del ciclo, haciendo fluir por el circuito corriente en todo momento. En conclusión, un condensador sí que permite el paso de la corriente alterna, aunque, como ya estudiaremos más adelante, se produce una distorsión o desfase en el tiempo entre la tensión y la corriente.

4.2 Capacidad de un condensador

Se denomina capacidad de un condensador a la propiedad que éste posee de almacenar mayor o menor cantidad de electricidad.

La cantidad de cargas que puede almacenar un condensador depende, fundamentalmente, de la tensión aplicada entre sus armaduras y de sus características constructivas.

Para entender mejor esto, vamos a comparar la capacidad de almacenar cargas de un condensador con la capacidad de almacenar aire de un globo.

Para que el aire entre en un globo es necesario insuflarlo con una cierta presión, de tal forma que, según aumentemos dicha presión, mayor será la cantidad de aire que conseguiremos almacenar en dicho globo (Figura 4.5).

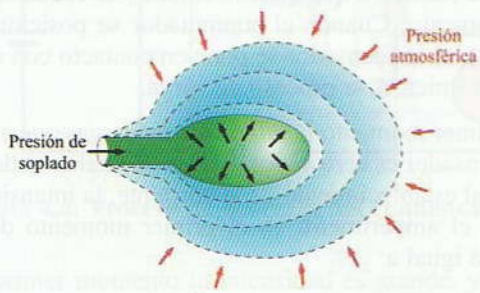


Figura 4.5. Comparación entre el llenado de un globo y la carga de un condensador

En conclusión, la cantidad de aire que es posible introducir en un globo depende del tamaño del globo y de la presión aplicada al mismo. Por supuesto, si la presión aplicada fuese superior a la que pueden soportar las paredes elásticas del globo, éste estallaría en pedazos.

Si ahora comparamos el concepto de presión aplicado al globo con el de tensión aplicado a las armaduras de un condensador, resultará que la cantidad de cargas almacenadas por un condensador será mayor al aumentar dicha tensión. Debe tenerse en cuenta que las cargas fluyen por las armaduras debido a la diferencia de cargas o tensión que le proporciona la pila o el generador.

Por otro lado, cuanto mayor sea la superficie del dieléctrico, menor es la distancia que separa las armaduras y mejor será la calidad del aislante, así como mayor será la capacidad de almacenar cargas del condensador.

Si llamamos Q a la cantidad de carga almacenada por el condensador, C a la capacidad del condensador y V a la tensión entre las armaduras, resulta que:

$$Q = C \cdot V$$

Q = Culombios.
C = Faradios.
V = Voltios.

La unidad de capacidad es el faradio (F). Se puede decir que un condensador posee la capacidad de un faradio cuando almacena una carga de un culombio al aplicar una tensión de un voltio entre sus placas.

El faradio es una unidad muy grande, por lo que se utilizan submúltiplos, correspondientes a su millonésima parte, milmillonésima parte y billonésima parte, que reciben los nombres de:

- **Microfaradio (μF)**

$$1\ \mu F = 1/1.000.000 = 0{,}000001 = 10^{-6}\ F$$

- **Nanofaradio (nF)**

$$1\ nF = 1/1.000.000.000 = 0{,}000000001 = 10^{-9}\ F$$

- **Picofaradio (pF)**

$$1\ pF = 1/1000000000000 = 0{,}000000000001 = 10^{-12}\ F$$

Actividad resuelta 4.1

Calcula la carga eléctrica almacenada por un condensador de 2.200 μF de capacidad cuando se le conecta a una pila de 4,5 V.

Solución: Lo primero que hacemos es cambiar las unidades:

$$\frac{2.200\ \mu F}{1.000.000} = 0{,}0022\ F$$

$$Q = C \cdot V = 0{,}0022 \cdot 4{,}5 = 0{,}0099 \text{ culombios}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La capacidad de un condensador es mayor cuanto más grande sea la superficie de sus armaduras, ya que al aumentar la superficie de cargas enfrentadas aumenta la carga del mismo. Por otro lado, la capacidad es menor cuanto mayor sea la distancia que separan a las mismas, ya que las cargas se mantienen sujetas en las armaduras gracias a la atracción que se produce entre ellas por el efecto de las diferencias de cargas. Si la distancia entre éstas fuera grande, apenas habría atracción y la capacidad disminuiría.

Por último, se ha comprobado que, según sea la sustancia aislante que se introduce entre las armaduras, la capacidad también varía. Este factor se mide con la constante dieléctrica de la sustancia que se utiliza como aislante.

La expresión matemática que relaciona la capacidad con sus características constructivas es:

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

Como la constante dieléctrica del vacío es igual a:

$$1/4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9 \ \mathrm{F \cdot m^{-1}}$$

la expresión final podría quedar así:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d}$$

S = Superficie de las armaduras en m^2.

d = Espesor del dieléctrico en m.

ε_r = Constante dieléctrica de la sustancia aislante relativa al vacío.

ε_0 = Constante dieléctrica del vacío.

En la Tabla 4.1 aparecen reflejados los valores de la constante dieléctrica de los materiales más comunes.

Tabla 4.1. Constante dieléctrica de diferentes aislantes.

Sustancia	ε	Sustancia	ε
Aire	1	Ebonita	2,5 a 3,2
Petróleo	2	Poliéster	3
Aceite mineral	2,2 a 2,4	Mica	3 a 6
Parafina	1,9 a 2,3	Porcelana	4,5 a 6
Papel	2 a 2,8	Vidrio	5 a 10
Madera	2 a 8	Baquelita	5,6 a 8,5

Actividad resuelta 4.2

Calcula la capacidad de un condensador si sus placas son de 0,1 m^2, la distancia entre placas de 0,3 mm y el dieléctrico es de: a) aire; b) poliéster.

Solución: a) Para un dieléctrico de aire tenemos que:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{0{,}1}{0{,}0003} =$$

$$= 2{,}95 \cdot 10^{-9} \ \mathrm{F} = 2{,}95 \ \mathrm{nF}$$

$$0{,}3 \ \mathrm{mm} = 0{,}3/1.000 = 0{,}0003 \ \mathrm{m}$$

b) Si utilizamos como dieléctrico el poliéster, obtendremos una capacidad tres veces superior, ya que $\varepsilon_r = 3$.

4.3 Carga de un condensador

Con ayuda del circuito de la Figura 4.6 vamos a estudiar el proceso de carga y descarga de un condensador.

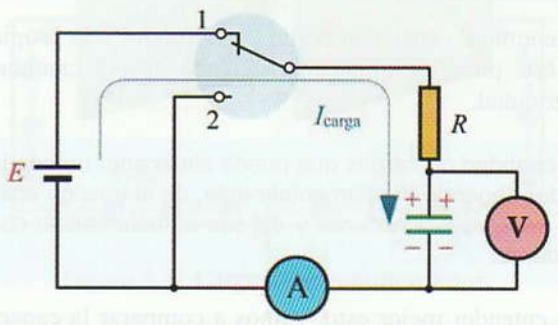


Figura 4.6. Ensayo para estudiar el proceso de carga de un condensador.

La resistencia R se ha conectado en serie con el circuito para retardar el proceso de carga (Figura 4.6). El amperímetro (A) nos indicará la intensidad de carga y el voltímetro (V) la tensión a que queda sometido el condensador en todo momento. Cuando el conmutador se posiciona en el punto (1), el condensador se pone en contacto con el generador y comienza su proceso de carga.

En el primer momento la diferencia de cargas que existe en el condensador es cero y, por tanto, al no haber nada que se oponga al establecimiento de la corriente, la intensidad que indicará el amperímetro en el primer momento de conexión será igual a:

$$i_{máx} = \frac{E}{R}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Según se va cargando el condensador la tensión de éste irá creciendo, tal como lo podríamos comprobar con el voltímetro. En consecuencia, la diferencia de potencial que existe entre el generador y el condensador se hace más pequeña y, por consiguiente se irá reduciendo la intensidad de carga. Cuando el condensador alcanza la misma tensión que el generador se completa el ciclo de carga y la intensidad de corriente queda interrumpida.

En las curvas de carga de la Figura 4.7 se puede apreciar claramente este proceso.

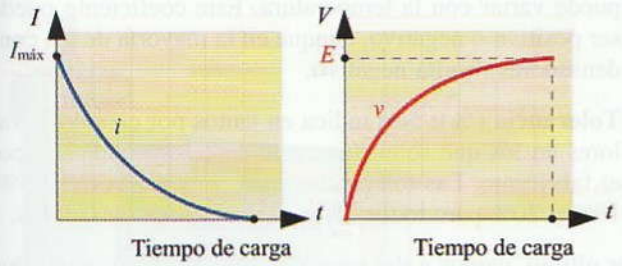


Figura 4.7. Curvas de carga de un condensador.

En conclusión, un condensador en C.C. sólo deja pasar la corriente durante el corto período de tiempo que dura su carga. Al cabo de este tiempo actúa como un interruptor abierto.

4.4 Descarga de un condensador

Al cambiar de posición el conmutador (Figura 4.8), el condensador se descarga por la resistencia.

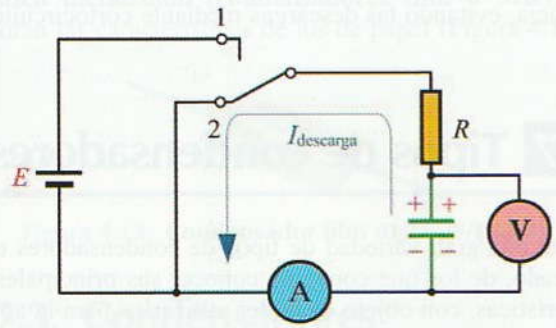


Figura 4.8. Proceso de descarga del condensador.

En un primer momento la intensidad es grande, ya que el condensador tiene toda la tensión (la misma que la del generador). Según se va descargando el condensador, la tensión se va reduciendo y con ella la intensidad de la corriente. Cuando el condensador se descarga totalmente la intensidad y la tensión se anulan, tal como se ha representado en las curvas de descarga de la Figura 4.9.

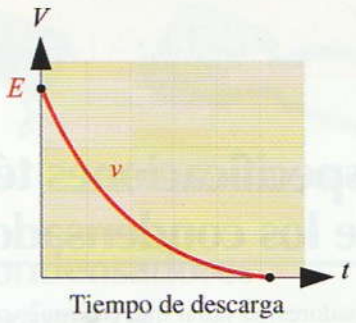


Figura 4.9. Curva de descarga de un condensador.

4.5 Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador

Se conoce por constante de tiempo al tiempo que invierte el condensador en adquirir el 63% de la carga total. La constante de tiempo del condensador es igual al producto $R \cdot C$.

Esta constante es igual de válida para calcular el tiempo de descarga de un condensador. En teoría, un condensador tardaría un tiempo infinito en cargarse o descargase totalmente; en la práctica se puede comprobar que, transcurrido un tiempo igual a *cinco constantes de tiempo*, se puede dar por terminado prácticamente el 100% del proceso de carga o descarga del condensador.

$$\tau = R \cdot C$$

Actividad resuelta 4.3

Determina la constante de tiempo del condensador del circuito de la Figura 4.10. Calcula también el tiempo de carga completa del condensador.

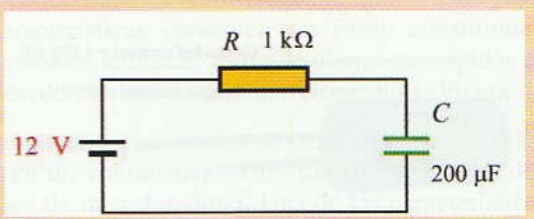


Figura 4.10.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución: La constante de tiempo será igual a:

$$\tau = R \cdot C = 1.000 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 0{,}2 \text{ segundos}$$

El tiempo total de carga se dará para cinco constantes de tiempo:

$$t = 5 \cdot \tau = 5 \cdot 0{,}2 = 1 \text{ segundo}$$

4.6 Especificaciones técnicas de los condensadores

Los condensadores, al igual que cualquier otro componente electrónico, vienen definidos por una serie de características. Éstas siempre se pueden encontrar en las hojas de especificaciones que nos facilita el fabricante.

- **Capacidad nominal:** El valor de la capacidad de un condensador puede cambiar con la frecuencia de trabajo (Hz) y con la temperatura ambiente, por lo que los fabricantes facilitan la capacidad junto con estos últimos parámetros.
- **Tensión de perforación del dieléctrico o tensión pico (V_p):** ¿Recuerdas cómo el globo descrito anteriormente estallaba en pedazos al aumentar la presión? De igual forma, si un condensador es sometido a una tensión excesiva, el dieléctrico no podrá soportarlo y se perforará. Téngase en cuenta que las armaduras están muy próximas y un aumento de la tensión produce, a su vez, un aumento de atracción entre las cargas de ambas armaduras.

  De aquí surge el concepto de tensión de perforación, que se define como la tensión máxima que es capaz de soportar un condensador sin que se destruya su dieléctrico.
- **Tensión de trabajo o nominal (V_n):** Por supuesto, no es recomendable que la tensión a la que trabaja un condensador sea mayor que la de perforación. De aquí nace el concepto de **tensión de trabajo**, que se define como la tensión a la que puede funcionar un condensador de forma permanente sin sufrir daños. Esta tensión es la que se encuentra indicada en la superficie de los condensadores (véase el ejemplo de la Figura 4.11).

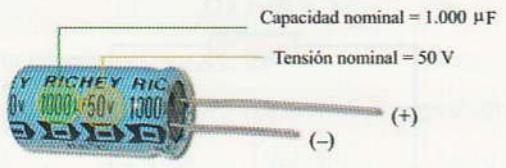


Figura 4.11. Características de un condensador electrolítico.

La tensión de trabajo de un condensador tiene una gran incidencia en las dimensiones de éstos. Cuanta más tensión de trabajo posea el condensador, mayor tiene que ser el espesor del dieléctrico, lo que hace que haya que aumentar, en estos casos, la superficie de las placas para conseguir una capacidad considerable. De tal forma que podremos encontrar condensadores de baja tensión y elevada capacidad que presenten un tamaño similar al de otros de elevada tensión y pequeña capacidad.

- **Coeficiente de temperatura (T_C):** Al igual que ocurría con las resistencias, la capacidad de un condensador puede variar con la temperatura. Este coeficiente puede ser positivo o negativo, aunque en la mayoría de los condensadores resulta negativo.
- **Tolerancia (%):** Nos indica en tantos por ciento los valores en los que se encuentra la capacidad indicada por el fabricante. Las tolerancias más comunes son del 5%, 10% y 20% para todos los modelos de condensadores.

Por último, vamos a dar unos consejos para conseguir que los condensadores tengan una larga vida, una vez estén conectados al circuito:

- Procurar que no queden expuestos a fuentes de calor (resistencias de mucha potencia, transformadores, etc.).
- Evitar dañar la envolvente del condensador, ya que, de debilitarse su estanqueidad, podría penetrar la humedad ambiente en el dieléctrico. Esto suele producir muchos fallos en los condensadores por perforación del dieléctrico. Dicha estanqueidad puede verse afectada simplemente al realizar una manipulación o soldadura incorrecta durante el montaje en la placa del circuito impreso.
- No someter al condensador a sobretensiones.
- No conviene almacenar los condensadores con carga.
- Para descargarlos, hacerlo siempre a través de una resistencia, evitando las descargas mediante cortocircuitos.

4.7 Tipos de condensadores

Existe una gran variedad de tipos de condensadores en el mercado, de los que conviene conocer sus principales características, con objeto de poder utilizarlos para la aplicación más idónea.

Al igual que las resistencias, existen condensadores variables a los que se les puede modificar su valor capacitivo. Estudiaremos aquí algunos de los condensadores fijos, que son los de más extendida aplicación.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

4.7.1. Condensadores de papel impregnado

Se fabrican enrollando dos láminas delgadas de aluminio de unos 0,006 mm de espesor (armaduras), separadas por otras dos de un papel impregnado con cera o aceite (dieléctrico) (Figura 4.12). De esta forma, se consigue aumentar la superficie de las armaduras sin aumentar excesivamente el tamaño del condensador. La tensión de trabajo depende del espesor del papel.

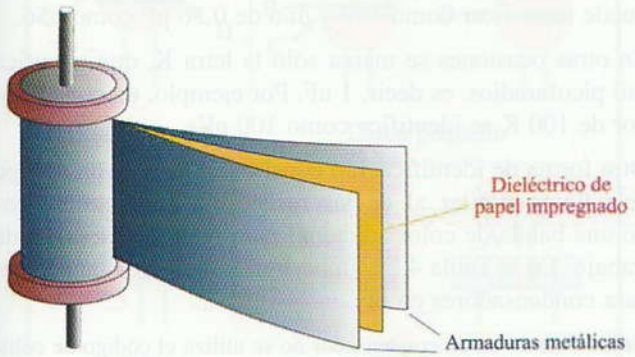


Figura 4.12. **Condensador de papel impregnado.**

4.7.2. Condensadores de papel metalizado

En este caso, el papel es metalizado con el fin de evitar que se formen vacíos entre las placas y el dieléctrico. De esta forma se consigue reducir su tamaño. Además poseen la propiedad de «auto-regeneración» del dieléctrico después de sufrir una perforación del mismo. También se fabrica una versión similar de este condensador utilizando plástico en vez de papel, dando como resultado **condensadores de plástico metalizado (condensadores film o MK)**, que mejoran las características de los de papel (Figura 4.13).

Figura 4.13. **Condensador film (0,27 µF/100 V).**

4.7.3. Condensadores de plástico

Actualmente son muy utilizados. Estos condensadores utilizan normalmente como dieléctrico el poliéster, poli-carbonatos, estiroflex, etc. Su utilización tiene la ventaja de conseguir capacidades relativamente elevadas a tensiones que lleguen hasta 1.000 V y capacidades desde un nanofaradio hasta algunos microfaradios (Figura 4.14).

Figura 4.14. **Condensadores de plástico.**

4.7.4. Condensadores cerámicos

Estos condensadores utilizan como dieléctrico compuestos cerámicos de una constante dieléctrica muy elevada. Con ellos se consiguen valores desde los pocos picofaradios hasta los 100 nF. Soportan poca tensión (Figura 4.15).

Figura 4.15. **Condensadores cerámicos.**

4.7.5. Condensadores de mica

Aprovechando la facilidad con la que se pueden fabricar láminas de mineral de mica de pequeño espesor uniforme, se pueden construir condensadores intercalando láminas de mica como dieléctrico y láminas de estaño o aluminio como placas. Se suelen emplear en circuitos de transmisión y recepción de radio (radiofrecuencia, RF).

4.7.6. Condensadores electrolíticos de aluminio

Estos condensadores se diferencian bastante del resto por sus características constructivas. Están constituidos por una lámina de aluminio y otra de plomo sumergidas en una solución de cloruro de amonio (electrólito) (Figura 4.16).

Son condensadores con los se consiguen capacidades elevadas en un volumen reducido (desde 1 µF hasta decenas de miles de microfaradios). Una de las características que diferencia a los condensadores electrolíticos de los demás es que tienen polaridad, es decir, no pueden invertirse las

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

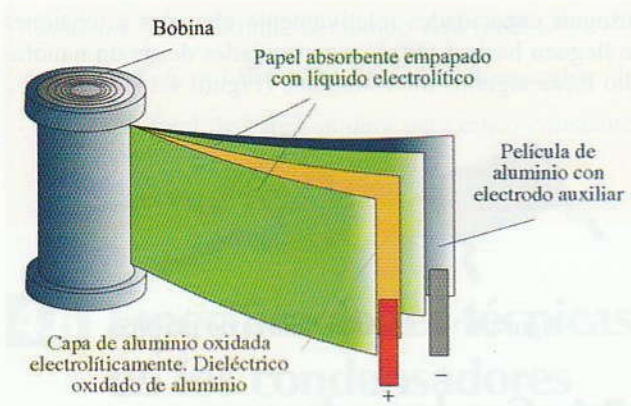


Figura 4.16. Condensador electrolítico seco.

conexiones indicadas en la superficie del componente ni, por tanto, aplicarse corriente alterna. En caso contrario, el condensador se perfora. En la actualidad, se fabrican **condensadores electrolíticos de tántalo** que reducen el tamaño para la misma capacidad que uno de aluminio. Además, el electrólito suele ser seco (Figura 4.17).

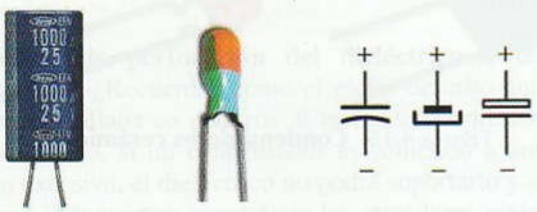


Figura 4.17. Condensadores electrolíticos: (a) de aluminio, (b) de tántalo, (c) símbolos.

4.8 Identificación de los valores de los condensadores

Por lo general, los valores de capacidad y tensión de trabajo aparecen inscritos en la superficie del condensador.

Cuando se trata de valores de capacidad con decimales no se marca la coma, sino que en su lugar se pone la letra *p* (pico) o *n* (nano). Así, por ejemplo, un condensador de 3,9 nF se puede identificar como 3*n*9 y uno de 0,56 pF como *p*56.

En otras ocasiones se marca sólo la letra K, que significa mil picofaradios, es decir, 1 nF. Por ejemplo, un condensador de 100 K se identifica como 100 nF.

Otra forma de identificación consiste en utilizar un código de colores similar al de las resistencias, pero incluyendo una banda de color adicional para marcar la tensión de trabajo. En la Tabla 4.2 se muestran los códigos de colores para condensadores en pF.

Nota: Cuando en un condensador no se utiliza el código de colores, la tolerancia se suele indicar con un código de una letra tal como se indica en la Tabla 4.3.

Así, por ejemplo, si encontramos un condensador con la indicación 100 J, nos indicará una capacidad de 100 pF y una tolerancia del 5%.

Seguidamente incluimos para los diferentes tipos de condensadores el significado de cada banda de color. La banda marcada con la letra F nos indica el coeficiente de temperatura del condensador.

Tabla 4.2. Código de colores para condensadores.

Color	A–B Cifras significativas	C Multiplicador	D Tolerancia		E Tensión		
			C < 10 pF	C > 10 pF	Poliéster	Styroflex	Tántalo
Negro	0	× 1	2 ± pF	± 20%		630 V	10 V
Marrón	1	× 10	0,1 ± pF	± 1%			
Rojo	2	× 100		± 2%	250 V	160 V	4 V
Naranja	3	× 1.000		± 3%			40 V
Amarillo	4	× 10.000			400	63 V	6,3 V
Verde	5	× 100.000	0,5 ± pF	± 5%			16 V
Azul	6	× 1.000.000			630 V	25 V	
Violeta	7	× 10.000.000					
Gris	8	× 0,01	0,25 ± pF				25 V
Blanco	9	× 0,1	1 ± pF	± 10%			2,5 V

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tabla 4.3. Valor de la tolerancia.

	Letra	A	B	D	F	G	H	J	K	M
Tolerancia	C < 10 pF ± pF	0,1	0,25	0,5	1	2				
	C > 10 pF ± %			5,5	1	2	2,5	5	10	20

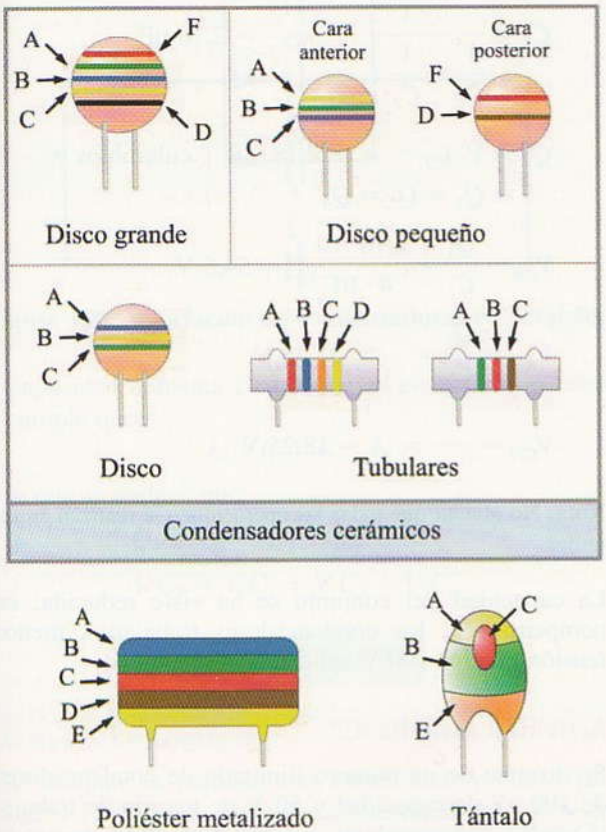


Figura 4.18. Códigos para diferentes tipos de condensadores.

Actividad resuelta 4.4

Determina las características del condensador de poliéster metalizado que aparece en la Figura 4.19.

Figura 4.19.

Solución: Situemos las cifras que van asociadas a los colores en el orden en que aparecen inscritos:

(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Amarillo	Azul	Rojo	Blanco	Rojo
(4)	(6)	(× 100)	(±10%)	(250 V)

$$46 \cdot 100 = 4.600 \text{ pF} = 4{,}6 \text{ nF}, \pm 10\%, 250 \text{ V}$$

Actividad resuelta 4.5

¿Cuáles son las características del condensador de tántalo de la Figura 4.20?

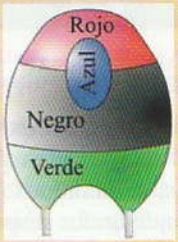


Figura 4.20.

Solución: Siguiendo la disposición de las cifras según la Figura 4.20.

(A)	(B)	(C)
Rojo (2)	Negro (0)	Azul (× 1.000.000)

$$20 \cdot 1.000.000 = 20.000.000 \text{ pF} = 20 \ \mu\text{F}$$

(E)

Tensión nominal = (Verde) = 18 V

4.9 Asociación de condensadores

En el caso de que un condensador no disponga de la capacidad o tensión de trabajo adecuada para nuestras necesidades, se pueden acoplar entre sí en serie o paralelo y así conseguir las características deseadas.

4.9.1. Asociación de condensadores en serie

La tensión aplicada al conjunto se reparte entre los terminales de cada uno de los condensadores (Figura 4.21), de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

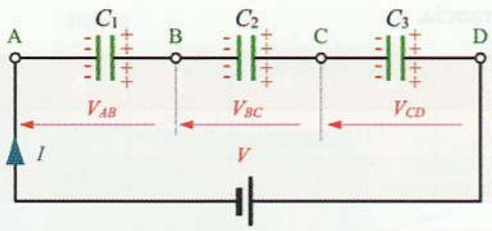


Figura 4.21. Asociación de condensadores en serie.

tal forma que se cumple la relación: $V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$. Con esta disposición, cada uno de los condensadores trabaja a una tensión más baja que la aplicada a su conjunto. Sin embargo, la capacidad total obtenida es inferior a la de cualquiera de ellos. Se cumple que:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Veamos cómo se llega a este resultado.

Como en el circuito en serie no existe más que una sola intensidad y como el tiempo de carga (t) es igual para todos los condensadores, si llamamos Q_1, Q_2 y Q_3 a la carga que consigue cada condensador respectivo y Q_T a la carga total, tendremos que:

$$I = \frac{Q_1}{t} = \frac{Q_2}{t} = \frac{Q_3}{t} = \frac{Q_T}{t}$$

de lo que se deduce que $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_T$.

Por otro lado, tenemos que $Q = V \cdot C$, despejando V, tenemos que:

$$V_{AB} = \frac{Q_1}{C_1}, \quad V_{BC} = \frac{Q_2}{C_2}, \quad V_{CD} = \frac{Q_3}{C_3}, \quad V = \frac{Q_T}{C_T}$$

Sustituyendo estos términos en la expresión de las tensiones:

$$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$$

tenemos que:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

Como las cargas son iguales:

$$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

De lo que se deduce la expresión de la capacidad total o equivalente C_T indicada al principio.

Actividad resuelta 4.6

Se conectan en serie tres condensadores de 4 μF, 8 μF y 12 μF a una fuente de alimentación de 100 V en C.C. Calcula la capacidad conseguida por el conjunto, así como la tensión a la que trabaja cada uno de los condensadores.

Solución:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \dots = 2{,}18 \ \mu F$$

$$Q_T = V \cdot C_T = \dots = 2{,}18 \cdot 10^{-4} \text{ culombios} =$$
$$= Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$V_{AB} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{2{,}18 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-6}} = 54{,}5 \text{ V}$$

$$V_{BC} = \frac{Q_2}{C_2} = \dots = 27{,}25 \text{ V}$$

$$V_{CD} = \text{——} = \dots = 18{,}25 \text{ V}$$

Nota: No olvidar que todas las operaciones se realizan en faradios.

La capacidad del conjunto se ha visto reducida; en compensación, los condensadores trabajan a menos tensión que los 100 V aplicados al conjunto.

Actividad resuelta 4.7

Se dispone de un número ilimitado de condensadores de 100 μF de capacidad y 50 V de tensión de trabajo. ¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 200 V y una capacidad de 25 μF? ¿Cómo hay que acoplarlos?

Solución: Al acoplar cuatro condensadores de 100 μF en serie, se consigue una capacidad equivalente igual a:

$$C_T = \frac{100}{4} = 25 \ \mu F$$

Al ser iguales los condensadores, la tensión se reparte por igual en cada condensador:

$$V = \frac{200}{4} = 50 \text{ V}$$

Con esta solución, hemos conseguido conectar a una tensión de 200 V, condensadores que sólo soportan 50 V. Por supuesto se ha hecho a costa de reducir la capacidad de 100 μF a 25 μF.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

4.9.2. Asociación en paralelo

En este acoplamiento, la tensión a la que quedan sometidos todos los condensadores es la misma y coincide con la aplicada al conjunto (Figura 4.22).

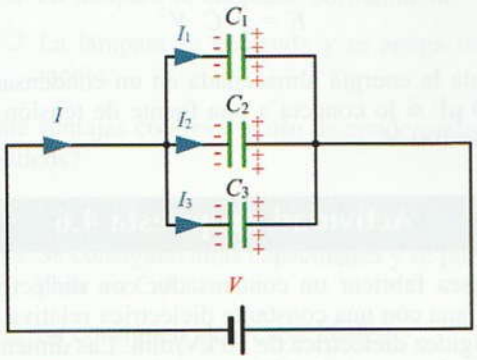


Figura 4.22. **Asociación de condensadores en paralelo.**

La capacidad aumenta cuando se los conecta en paralelo. Se cumple que:

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3$$

de lo que se deduce que:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$V\,C_T = V\,C_1 + V\,C_2 + V\,C_3$$

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Actividad resuelta 4.8

Se acoplan en paralelo tres condensadores de 4 μF, 8 μF y 12 μF a una fuente de alimentación de 100 V en C.C. Averigua la capacidad del conjunto, así como la tensión a la que trabajan los condensadores.

Solución: La capacidad total conseguida es:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = \cdots = 24\ \mu F$$

La tensión de trabajo de los condensadores es igual para todos: 100 V.

Con este montaje, hemos conseguido aumentar la capacidad mientras que la tensión de trabajo permanece invariable.

Actividad resuelta 4.9

Determina cuántos condensadores de 20 μF de capacidad y 5 V de tensión de trabajo hay que conectar para conseguir un equivalente de 20 μF/10 V.

Solución: Al conectar dos condensadores en serie, se consigue aumentar la tensión hasta 10 V a costa de reducir la capacidad a 10 μF. Si ahora conectamos otra rama de dos condensadores en serie que, a su vez, estén conectados en paralelo con la otra rama conseguiremos aumentar la capacidad hasta los 20 μF sin modificar la tensión, tal como se indica en la Figura 4.23.

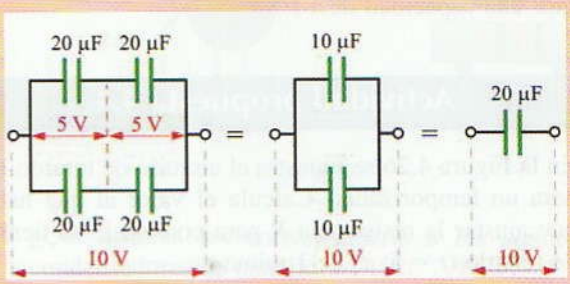


Figura 4.23.

Actividad propuesta 4.1

Un condensador de 100 μF se carga con una tensión de 10 V (posición del conmutador en 1, Figura 4.24). Posteriormente se conectan sus armaduras a las de otro condensador de 50 μF (posición del conmutador en 2) que se encuentra totalmente descargado. Averigua cuál será la tensión a la que quedan sometidos los dos condensadores una vez que el primer condensador se haya descargado sobre el segundo y la carga eléctrica haya sido almacenada en cada uno de ellos.

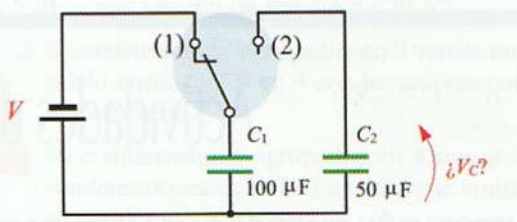


Figura 4.24.

Actividad propuesta 4.2

Calcula la capacidad equivalente y la tensión a la que queda sometido cada condensador del circuito de la Figura 4.25.

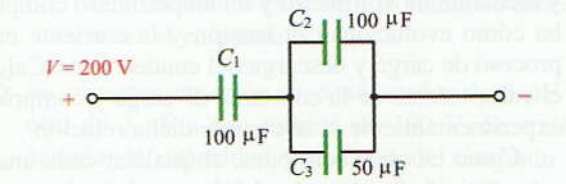


Figura 4.25.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad propuesta 4.3

¿Cuáles tendrían que ser las dimensiones cuadradas de las armaduras de un condensador con dieléctrico de aire y una separación entre ellas de 1 mm, para conseguir una capacidad de 1 F?

Actividad propuesta 4.4

En la Figura 4.26 se muestra el circuito de retardo RC para un temporizador. Calcula el valor al que habrá que ajustar la resistencia R para conseguir un tiempo de retardo ($t = 5 \cdot \tau$) de 1 minuto.

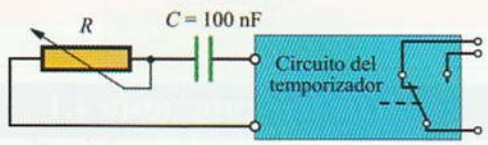


Figura 4.26.

Actividad propuesta 4.5

Sabiendo que la energía E que almacena en julios un condensador de capacidad C cuando es cargado con una tensión V se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

Calcula la energía almacenada en un condensador de 2.000 μF si lo conecta a una fuente de tensión continua de 100 V.

Actividad propuesta 4.6

Se desea fabricar un condensador con dieléctrico de porcelana con una constante dieléctrica relativa de 5 y una rigidez dieléctrica de 10 kV/mm. Las dimensiones de las placas son de 100 mm de largo por 10 mm de ancho. Calcula la capacidad y tensión de perforación del condensador en los siguientes casos:

a) Separación de las armaduras de 0,001 mm.

b) Separación de las armaduras de 0,01 mm.

*** La solución a estas actividades propuestas se encuentran en www.paraninfo.es.*

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

4.1 Identificación de un condensador. Consigue diferentes tipos de condensadores e identifica sus características más relevantes.

4.2 Carga y descarga de un condensador. Conecta un condensador de gran capacidad con una resistencia en serie, tal como se indica en el circuito de la Figura 4.6 y mediante un voltímetro y un amperímetro comprueba cómo evolucionan la tensión y la corriente en el proceso de carga y descarga del condensador. Calcula el valor teórico de la constante de carga y comprueba experimentalmente si se cumple dicha relación.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para su adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

AUTOEVALUACIÓN

4.1 ¿Cuáles son las características que hay que conocer para definir un condensador comercial?

A ❑ Capacidad y potencia.

B ❑ Capacidad, tipo de dieléctrico, separación entre placas.

C ❑ Tipo, capacidad, tensión nominal, tolerancia y coeficiente de temperatura.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

4.2 ¿Qué ocurre si en un circuito de una lámpara alimentada por una fuente de alimentación de C.C. intercalamos en serie un condensador?

A ❑ La lámpara se enciende durante un pequeño tiempo y luego se apaga totalmente.

B ❑ La lámpara se enciende normalmente.

C ❑ La lámpara se enciende y se apaga constantemente.

4.3 ¿Qué ventajas conlleva el uso de condensadores electrolíticos?

A ❑ Soportan tensiones de trabajo fuertes.

B ❑ Se consiguen altas capacidades y se pueden emplear en C.A.

C ❑ Se consiguen altas capacidades.

4.4 ¿Qué ventajas aporta la conexión de condensadores en serie?

A ❑ Se aumenta la capacidad del conjunto de condensadores acoplados.

B ❑ Se consigue aumentar la tensión de trabajo del conjunto de condensadores acoplados.

C ❑ Se aumenta la tensión y la capacidad.

4.5 ¿Qué puede ocurrir cuando se supera la tensión de trabajo de un condensador?

A ❑ El condensador se calienta.

B ❑ El condensador cambia la capacidad nominal.

C ❑ El condensador se puede perforar y destruir.

4.6 Calcula la carga eléctrica que almacena un condensador de 1.000 µF cuando es sometido a las siguientes tensiones: 4 V, 20 V y 100 V, respectivamente.

4.7 ¿Qué espesor deberá tener el dieléctrico de un condensador plano de porcelana ($\varepsilon = 5{,}5$) para conseguir una capacidad de 1 nF, si posee unas armaduras con unas dimensiones de 50 cm × 2 cm?

4.8 Determina la constante de tiempo y el tiempo que invierte un condensador de 100 µF cargado con 24 V en descargarse totalmente a través de una resistencia de 100 Ω.

4.9 Determina las características de los condensadores de poliéster metalizado que aparecen con los colores:

C_1: (rojo, violeta, naranja, verde, azul).

C_2: (marrón, rojo, naranja, marrón, rojo).

C_3: (rojo, verde, rojo, blanco, amarillo).

4.10 Determina las características de los condensadores de cerámica que aparecen en la Figura 4.27.

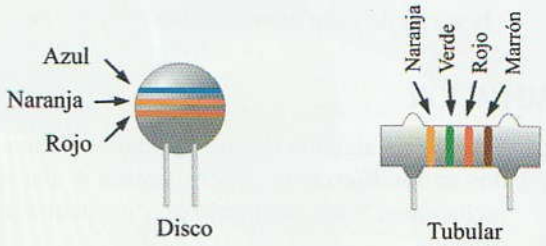


Figura 4.27.

4.11 ¿Qué colores les correspondería a los siguientes condensadores de tantalio?

$C_1 = 3{,}3$ µF/10 V

$C_2 = 57$ µF/25 V

$C_3 = 150$ µF/4 V

4.12 Se dispone de un número ilimitado de condensadores de 10 µF de capacidad y 5 V de tensión de trabajo. ¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 20 V y una capacidad de 2,5 µF? ¿Cómo hay que acoplarlos?

A ❑ 4 condensadores en paralelo.

B ❑ 4 condensadores en serie.

4.13 ¿Y para conseguir un equivalente con una capacidad de 5 µF y una tensión de trabajo de 20 V?

A ❑ 8 condensadores agrupados en 2 ramas en paralelo consistentes en 4 condensadores conectado en serie.

B ❑ 16 condensadores agrupados en 4 ramas de 4 condensadores en serie. Las ramas se conectan en paralelo.

4.14 ¿Y para conseguir un equivalente con la misma capacidad (10 µF) y una tensión de trabajo de 15 V?

A ❑ 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en serie.

B ❑ 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en paralelo.

4.15 Se conectan en serie un condensador de 6 µF con otro de 3 µF a una tensión de 100 V. Se trata de calcular la capacidad y la carga del conjunto formado, así como la carga y tensión de cada condensador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

4.16 Se conectan en paralelo un condensador de 5 µF con uno de 15 µF a una tensión de 100 V. Calcula la capacidad y la carga del conjunto formado, así como la carga de cada condensador.

AMPLIACIÓN

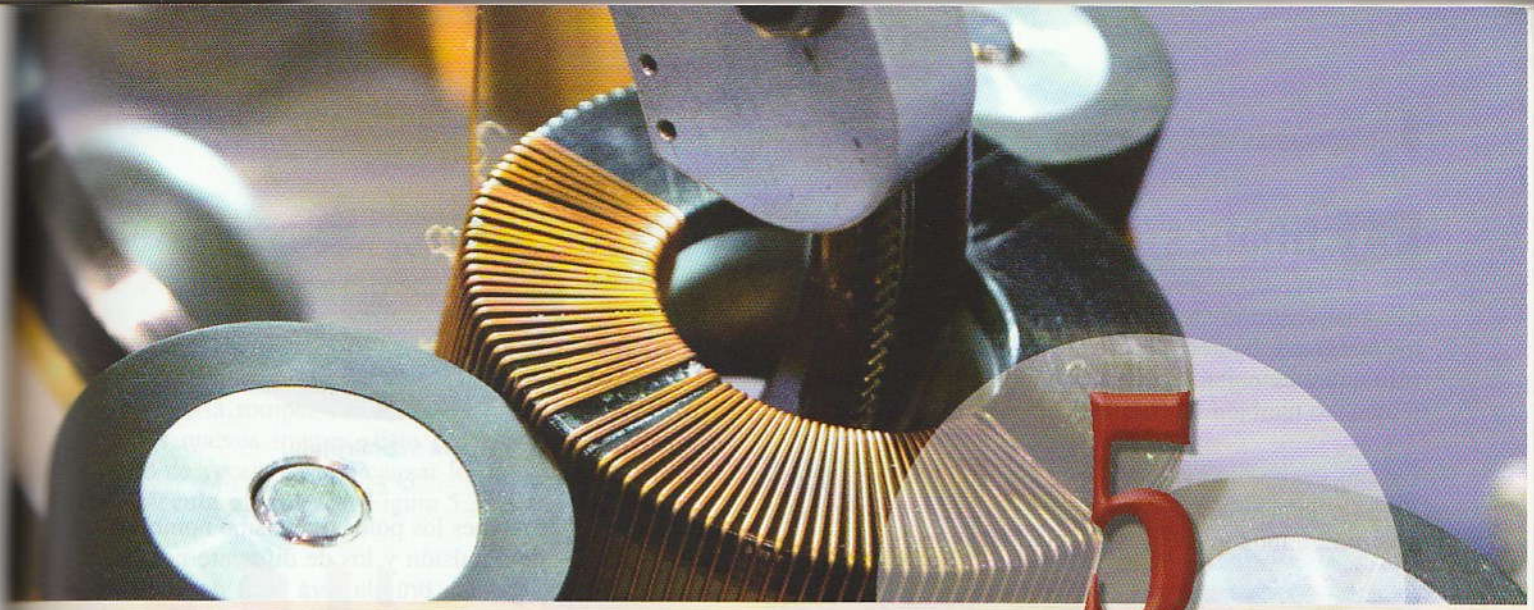
4.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 4*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

4.2 Busca fabricantes y distribuidores de condensadores para circuitos electrónicos y analiza las características de los diferentes tipos fabricados, como pueden ser: aplicaciones, dimensiones, tensiones, tolerancias, valores capacitivos fabricados, etc.

4.3 Consulta en www.paraninfo.es los documentos: ***Código JIS para identificación de condensadores*** y ***Ejemplos prácticos de identificación de condensadores***.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



5

Magnetismo y electromagnetismo

El magnetismo tiene que ver con fenómenos de atracción y repulsión que se dan con los imanes y con los materiales ferromagnéticos, y el electromagnetismo con fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica. El estudio de estas dos ciencias es importante, ya que aprovechando estos fenómenos se pueden construir electroimanes, transformadores, motores, generadores de electricidad como las dinamos y alternadores, altavoces, relés y contactores, cerraduras electromagnéticas, cocinas de inducción, detectores de metales, electroválvulas y un sinfín más de aplicaciones.

Contenido

5.1. Imanes
5.2. Electromagnetismo
5.3. Magnitudes magnéticas
5.4. Electroimanes
5.5. Inducción electromagnética
5.6. Autoinducción. Bobinas
5.7. Compatibilidad electromagnética
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Entender los efectos de los campos magnéticos.
- Determinar el espectro magnético de un imán.
- Relacionar las magnitudes fundamentales básicas de un campo magnético con sus unidades de medida y entender su importancia en un circuito magnético.
- Determinar la relación existente entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos.
- Determinar el sentido de las líneas de fuerza de un campo electromagnético, así como la intensidad y densidad del mismo.
- Apreciar la importancia de la permeabilidad magnética en la construcción de núcleos para bobinas.
- Interpretar la curva de magnetización.
- Describir los procesos que se dan en la inducción electromagnética.
- Analizar los fenómenos que se dan en la apertura y el cierre de un circuito con bobina.
- Comprender la importancia del coeficiente de autoinducción de una bobina.
- Describir el fenómeno de la interferencia electromagnética.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

5.1 Imanes

Si tomamos un imán e intentamos acercar diferentes objetos metálicos, podremos observar que éste atrae con fuerza sólo aquellos objetos que sean de hierro o de acero. Este fenómeno también se da con el níquel y el cobalto.

A estos materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se los conoce por el nombre de **materiales ferromagnéticos**.

Las aplicaciones de los imanes son muy variadas, ya que con ellos se pueden producir fuerzas mecánicas considerables. Así, por ejemplo, se pueden utilizar como separadores magnéticos que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos. Otras aplicaciones de los imanes son pequeñas dinamos, micrófonos, altavoces, aparatos de medida analógicos y pequeños motores eléctricos de C.C.

5.1.1. Polos de un imán

Si depositamos una cantidad de limaduras de hierro sobre un imán recto, como el de la Figura 5.1, podremos observar que aparece una mayor concentración de éstas en los extremos del imán. A su vez también se puede comprobar cómo esta concentración disminuye hacia el centro, hasta desaparecer prácticamente en el centro.

Las zonas donde se produce la mayor atracción se denominan polos magnéticos. La zona donde no hay atracción se denomina línea neutra.

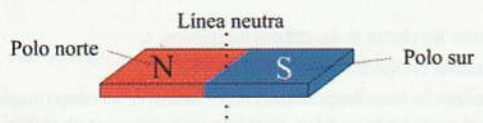


Figura 5.1. **Polos de un imán.**

5.1.2. Brújula

Una brújula es una aguja imantada que puede girar libremente en su eje central (Figura 5.2). Si nosotros dejamos girar libremente a la aguja imantada de una brújula, ésta se orientará siempre con un extremo hacia el polo norte terrestre y el otro hacia el sur. De aquí proviene el nombre de los polos de un imán. Al extremo de la aguja que se orienta hacia el norte geográfico terrestre se lo denomina **polo norte** y al otro, **polo sur**.

Figura 5.2. **Brújula.**

Dado que en los imanes los polos del mismo nombre desarrollan fuerzas de repulsión y los de diferente nombre, de atracción, mediante una brújula será fácil determinar los nombres de los polos. Para ello bastará con acercar la brújula a uno de los polos del imán y comprobar si existe atracción o repulsión del polo norte de aquélla.

5.1.3. Clases de imanes

En la naturaleza se pueden encontrar **imanes naturales**, como la magnetita, que posee ciertas propiedades magnéticas. Ahora bien, si lo que deseamos es potenciar dichas propiedades se pueden fabricar **imanes artificiales** a partir de sustancias ferromagnéticas.

A su vez, los imanes artificiales, o sustancias magnetizadas, dependiendo del tipo de sustancia utilizada, una vez magnetizados pueden mantener durante largo tiempo sus propiedades magnéticas (imanes permanentes) o sólo cuando están sometidos a la acción de un campo magnético (imanes temporales).

Como ejemplo de imanes temporales, tenemos el hierro puro y como imán permanente, el acero. Mediante una sencilla experiencia se puede comprobar que, al acercar un trozo de acero (por ejemplo, un destornillador) a un imán, el acero queda magnetizado, apreciándose sus propiedades de atracción aunque retiremos el imán de dicho trozo de acero. Sin embargo, si utilizamos un trozo de hierro para la experiencia (por ejemplo, un clavo de hierro), éste manifiesta propiedades de atracción hacia otros materiales sólo cuando está bajo la acción del campo magnético del imán; una vez retirado el imán, dicho trozo de hierro pierde prácticamente todas las propiedades magnéticas adquiridas.

Para la construcción de imanes permanentes se utilizan aleaciones de acero-tungsteno, acero-cobalto, acero al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto, etc.

Los imanes temporales son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general, con silicio.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

5.1.4. Teoría molecular de los imanes

Si rompemos un imán en dos, las dos partes resultantes son dos imanes completos con sus polos correspondientes. Si volviésemos a romper una de estas partes, obtendríamos otros dos nuevos imanes. Este proceso se puede repetir multitud de veces, hasta alcanzar lo que vendremos a llamar **molécula magnética** (Figura 5.3).

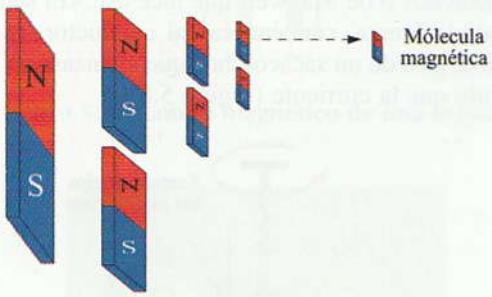


Figura 5.3. Molécula magnética.

Según esta teoría, se puede suponer que un imán está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas con los polos respectivos del imán [Figura 5.4(a)]. Un trozo de hierro sin imantar está compuesto de moléculas magnéticas totalmente desorientadas [Figura 5.4(b)].

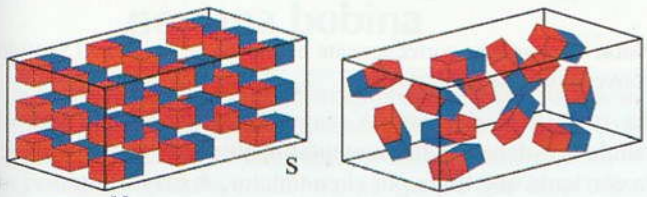


Figura 5.4. Moléculas magnéticas de un imán (a) y de un trozo de hierro (b).

Esta teoría nos servirá de gran ayuda para comprender fenómenos complejos, como la permeabilidad, la saturación magnética, la histéresis, etc., que estudiaremos más adelante.

Gracias a esta teoría también podremos entender más fácilmente el comportamiento de los materiales magnéticos utilizados para la elaboración de imanes permanentes y artificiales. En el caso de los imanes permanentes, aparece una especie de rozamiento interno entre las moléculas magnéticas que dificulta el retorno al estado inicial, una vez orientadas y magnetizadas. Al contrario, en los imanes temporales las moléculas magnéticas se ordenan y desordenan con facilidad, en función de la influencia ejercida por la acción de un campo magnético externo al mismo.

Las propiedades magnéticas de los imanes se ven alteradas por la temperatura; así, por ejemplo, el hierro puro pierde totalmente su magnetismo por encima de los 769 °C. Por otro lado, si golpeamos fuertemente un trozo de acero imantado se pueden modificar sus propiedades magnéticas. Esto es debido a que los golpes pueden cambiar el orden de las moléculas magnéticas.

5.1.5. Campo magnético de un imán

Se puede decir que el campo magnético es el espacio, próximo al imán, en el cual son apreciables los fenómenos magnéticos originados por dicho imán.

El campo magnético de un imán es más intenso en unas partes que otras. Así, por ejemplo, el campo magnético adquiere su máxima intensidad en los polos, disminuyendo paulatinamente según nos alejamos de ellos. Para poder hacernos una idea del aspecto que tiene el campo magnético, o sea, de su espectro magnético, realiza la siguiente experiencia:

Actividad experimental 5.1

Se toma un imán sobre el que se coloca una lámina de plástico transparente y se espolvorea con limaduras de hierro, procurando que queden uniformemente repartidas por toda la superficie de la lámina de plástico transparente. Las limaduras de hierro se orientan sobre la misma, dibujando la forma del campo magnético (Figura 5.5).

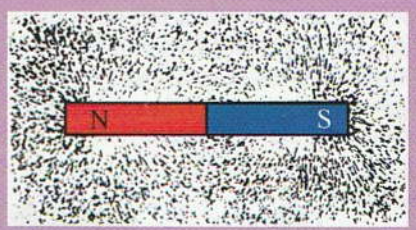


Figura 5.5. Espectro magnético de un imán.

Observa que hay más limaduras concentradas en los extremos y que existen unas cadenas de limaduras formando unas líneas que van de un polo a otro. A estas cadenas se las conoce por el nombre de **líneas de fuerza del campo magnético.**

Las líneas de campo se pueden dibujar tal como se muestra en la Figura 5.6. Las líneas de fuerza únicamente representan la forma del campo magnético. Ahora bien, por motivos de convencionalismos teóricos, se les da un sentido de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

circulación, de tal forma que se dice que las líneas de campo salen por el polo norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo sur. El sentido de circulación de estas líneas por el interior del imán es de sur a norte.

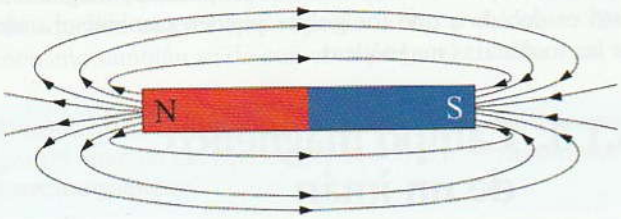


Figura 5.6. **Líneas de fuerza del campo magnético.**

5.2 Electromagnetismo

Los imanes producen un campo magnético considerable, pero para ciertas aplicaciones éste resulta todavía muy débil. Para conseguir campos más intensos utilizaremos bobinas fabricadas con conductores eléctricos, que, al ser recorridos por una corriente eléctrica, desarrollan campos magnéticos, cuya intensidad depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina.

5.2.1. Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica

Si nosotros espolvoreamos limaduras de hierro sobre una hoja de papel que es atravesada por un conductor por donde circula una corriente eléctrica [Figura 5.7(a)], observaremos que las limaduras se orientan y forman un espectro magnético de forma circular [Figura 5.7(b)].

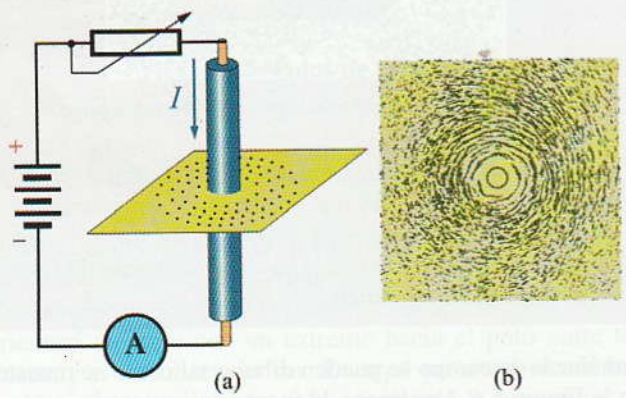


Figura 5.7. **(a) Campo magnético de un conductor. (b) Espectro magnético.**

Esto demuestra que, cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético. Observando el espectro del campo magnético se puede apreciar que las líneas de fuerza toman la forma de círculos concéntricos que se cierran a lo largo de todo el conductor.

Si situamos varias agujas imantadas alrededor del conductor, podremos observar que su orientación depende del sentido de la corriente. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de una forma sencilla, se aplica la regla del sacacorchos o de Maxwell que dice así: «El sentido de las líneas de fuerza, concéntricas al conductor, es el que indicaría el giro de un sacacorchos que avanzase en el mismo sentido que la corriente (Figura 5.8)».

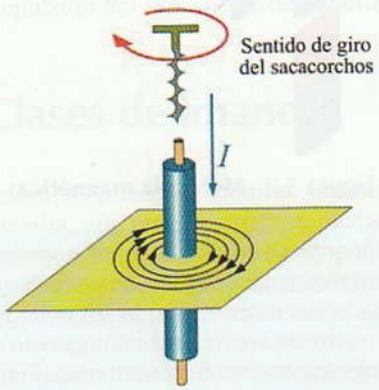


Figura 5.8. **Regla del sacacorchos o de Maxwell.**

Nota: Para aplicar correctamente esta regla se emplea el sentido convencional de la corriente.

La intensidad del campo magnético desarrollado por el conductor depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor. A mayor intensidad de corriente, mayor intensidad de campo.

5.2.2. Campo magnético en un conductor en forma de anillo

Un conductor recto produce un campo magnético muy disperso y, por tanto, muy débil. La forma de conseguir que el campo magnético sea más fuerte es disponiendo el conductor en forma de anillo.

El sentido de las líneas de fuerza de una parte del conductor se suma a la del otro, formando un campo magnético mucho más intenso en el centro de la espira (Figura 5.9). En la Figura 5.10 se puede apreciar el efecto de concentración de las líneas de campo en el centro del anillo al que,

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

como en otras ocasiones, se le ha realizado el espectro magnético con limaduras de hierro.

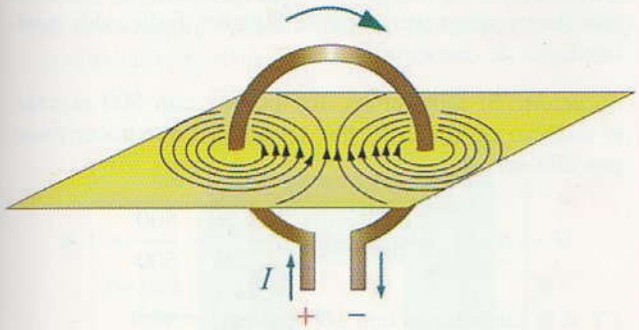


Figura 5.9. **Campo magnético de una espira.**

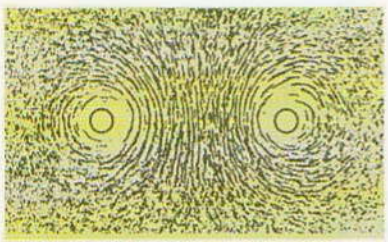


Figura 5.10. **Espectro magnético de una espira.**

5.2.3. Campo magnético formado por una bobina

En una bobina, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose éste en el centro de la misma. El campo resultante es uniforme en el centro de la espira y mucho más intenso que en el exterior. En los extremos de la bobina se forman polos magnéticos (Figura 5.11).

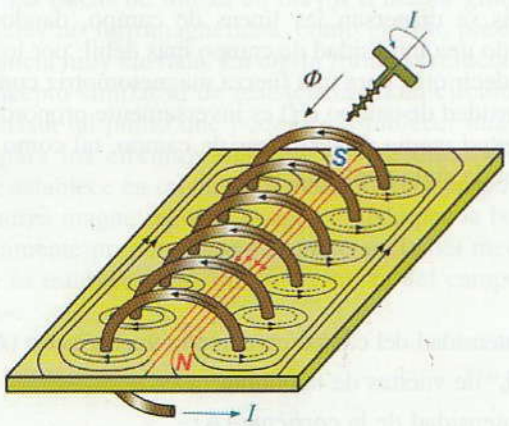


Figura 5.11. **Campo magnético de una bobina.**

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza, se aplica la regla del sacacorchos, pero de otra forma. Basta con girar el sacacorchos, en el mismo sentido de giro que la corriente eléctrica por las espiras. El sentido de avance del sacacorchos nos indica el sentido de las líneas de fuerza. Una vez determinado este sentido, es fácil determinar los polos de la bobina (el polo norte estará situado en el extremo por donde salen las líneas de fuerza y el sur por donde entran).

5.3 Magnitudes magnéticas

Al igual que, para definir el comportamiento de un circuito eléctrico utilizamos las magnitudes eléctricas, para definir los campos electromagnéticos utilizamos las magnitudes magnéticas.

5.3.1. Flujo magnético (Φ)

El campo magnético se representa a través de las líneas de fuerza. La cantidad de estas líneas se denomina flujo magnético.

Se representa por la letra griega Φ; sus unidades son:

— El **weber (Wb)**, en el sistema internacional.

— El maxvelio, en el sistema CGS (Mx).

La relación que existe entre ambas unidades es 1 Wb = $= 10^8$ Mx.

5.3.2. Inducción magnética (*B*)

La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie. En cierta forma, nos indica lo densas que son las líneas de fuerza, o lo concentradas que están, en una parte del campo magnético (Figura 5.12).

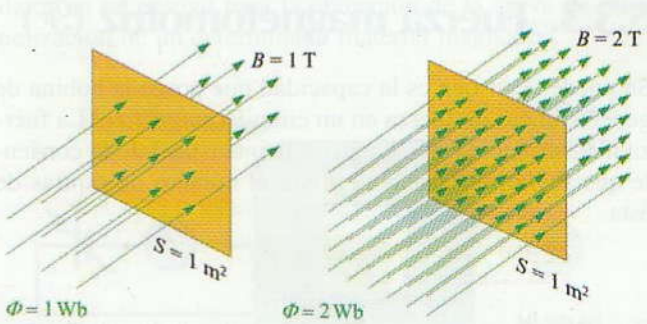


Figura 5.12. **Comparación entre un campo magnético con una inducción magnética de 1 tesla y otro más denso de 2 teslas.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Se representa por la letra B; sus unidades son:

— La **tesla (T)**, en el sistema internacional.

— El gauss (Gs), en el sistema CGS.

La relación que existe entre ambas unidades es $1\ T = 10^4$ Gs.

Se dice que existe una inducción de un tesla cuando el flujo de un weber atraviesa perpendicularmente una superficie de un metro cuadrado.

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2}$$

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Actividad resuelta 5.1

¿Cuál es la inducción magnética existente en la cara plana del polo de un imán recto de 30 cm^2 de superficie cuando es atravesado por un flujo magnético de 0,009 Wb? Expresa el resultado en teslas.

Solución: $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0{,}009}{0{,}003} = 3\ T$

$30\ cm^2 = 30/10.000 = 0{,}003\ m^2$

Actividad resuelta 5.2

¿Cuál será el flujo magnético que existe en el campo magnético producido por una bobina, si ésta tiene un núcleo de 20 cm^2 de superficie y la inducción magnética en ella es de 1,5 teslas?

Solución: Despejando de la fórmula general:

$\Phi = B \cdot S = 1{,}5 \cdot 0{,}002 = 0{,}003$ Wb $= 3$ mWb (miliweber)

5.3.3. Fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$)

Se puede decir que es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras de ésta.

$$\mathcal{F} = N \cdot I$$

$\mathcal{F}$ = Fuerza magnetomotriz en amperio-vuelta (Av).

N = Número de espiras.

I = Intensidad de corriente (A).

Actividad resuelta 5.3

Para el funcionamiento de un electroimán se necesita una fuerza magnetomotriz de 500 Av. Indica dos posibilidades de conseguirlo.

Solución: Si fabricamos una bobina con 500 espiras, el número de amperios que tendremos que hacer pasar por ella será de:

$$\mathcal{F} = N \cdot I, \quad \text{despejando} \quad I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{500}{500} = 1\ A$$

¿Y si la fabricamos con 100 espiras?

$$I = \frac{500}{100} = 5\ A$$

Para la fabricación de electroimanes muy potentes, como, por ejemplo, los que se utilizan para suspender en un colchón magnético un tren de alta velocidad sobre un monorraíl, se necesitan fuerzas magnetomotrices muy elevadas. Es decir, bobinas con muchas espiras que son atravesadas por grandes intensidades de corriente. Para evitar fabricar bobinas de grandes dimensiones, se utilizan materiales superconductores. De esta forma se consiguen potentísimos campos magnéticos con pocas espiras y corrientes de miles de amperios, que no calientan los superconductores por el efecto Joule por carecer éstos de resistencia eléctrica.

5.3.4 Intensidad de campo magnético (H)

Nos indica lo intenso que es el campo magnético. La intensidad de campo en una bobina depende de la fuerza magnetomotriz ($N \cdot I$). Ahora bien, cuanto más larga es la bobina, más se dispersan las líneas de campo, dando como resultado una intensidad de campo más débil; por lo que se puede decir que, para una fuerza magnetomotriz constante, la intensidad de campo (H) es inversamente proporcional a la longitud media de las líneas de campo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

H = Intensidad del campo en amperio-vuelta/metro (Av/m).

N = N.º de vueltas de la bobina.

I = Intensidad de la corriente (A).

L = Longitud de la bobina (m).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 5.4

Calcula la intensidad del campo en el interior de la bobina de la Figura 5.13. Su número de espiras es de 300 y la corriente de 10 A.

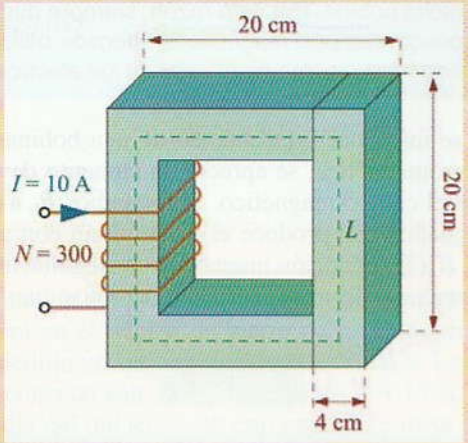


Figura 5.13.

Solución: Primero determinamos la línea media por donde se van a establecer las líneas de campo. Para ello, observamos las dimensiones del núcleo de la bobina:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0{,}64 \text{ m}$$

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 10}{0{,}64} = 4.687{,}5 \text{ Av/m}$$

5.3.5. Reluctancia ($\Re$)

La reluctancia de un material nos indica si éste deja establecer las líneas de fuerza en mayor o menor grado. Los materiales no ferromagnéticos, como el aire, poseen una reluctancia muy elevada. En cierta forma la reluctancia es un concepto similar al de resistencia en un circuito eléctrico, hasta tal punto que podemos establecer una ley de Ohm para los circuitos magnéticos que diga: «El flujo que se establece en un circuito magnético es proporcional a la fuerza magnetomotriz proporcionada por la bobina e inversamente proporcional a la reluctancia del medio por donde se establecen las líneas de fuerza del campo magnético»:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\Re}$$

Esta expresión también se conoce por **ley de Hopkinson**.

La reluctancia es una característica propia de cada material magnético y de la ley de Hopkinson se deduce que:

$$\Re = \frac{\mathcal{F}}{\Phi}$$

Las unidades que le corresponden son: Av/Wb

Actividad resuelta 5.5

Calcula la reluctancia que posee el núcleo de un electroimán si al hacer circular 5 A por la bobina de 1.000 espiras se ha establecido un flujo magnético de 5 mWb.

Solución: La fuerza magnetomotriz de la bobina del electroimán es:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 1.000 \cdot 5 = 5.000 \text{ Av}$$

Si se establecen en el núcleo de hierro 5 mWb significa que su reluctancia es:

$$\Re = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{5.000}{0{,}005} = 1.000.000 \text{ Av/Wb}$$

5.3.6. Curva de magnetización. Saturación magnética

Cuando se somete una sustancia a la acción de un campo magnético creciente H, la inducción magnética que aparece en ella también aumenta en una relación determinada. Por lo general, esta relación (B-H) no es constante, por lo que es de gran utilidad conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material. En la Figura 5.14 se muestra el montaje que podría realizarse para la toma de datos en un ensayo para la obtención de la curva de magnetización de un determinado material magnético.

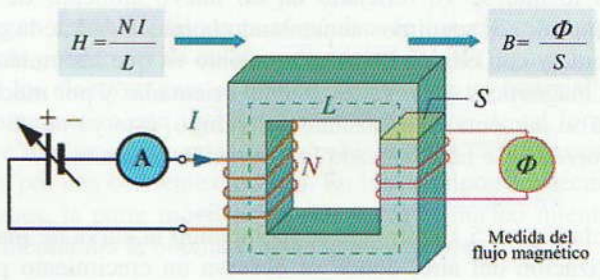


Figura 5.14. **Ensayo para la obtención de la curva de magnetización.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la curva de la Figura 5.15 se ha representado la relación *B-H* de un hierro dulce. En ella se puede apreciar que para valores de intensidad de campo de hasta 200 Av/m (tramo a-b), la inducción magnética crece proporcionalmente hasta 1,2 T. A partir de este punto, aparece un punto de inflexión en la curva, y a los aumentos de la intensidad de campo les corresponden aumentos pequeñísimos de inducción magnética. A partir de ese punto, se dice que el hierro ha alcanzado la **saturación magnética**.

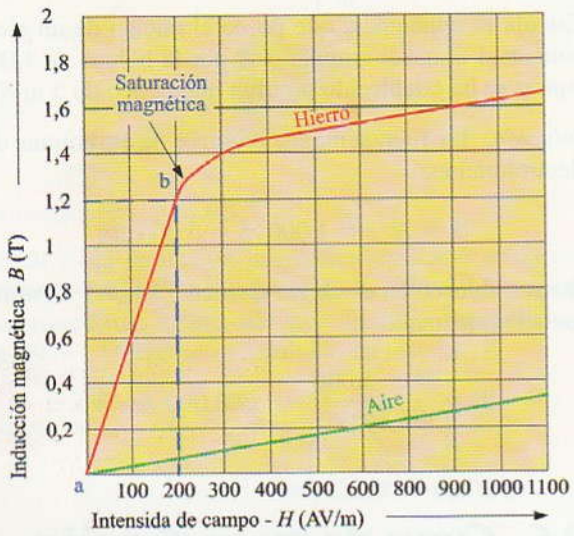


Figura 5.15. Curva de magnetización.

Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: «Cuando se introduce en una bobina un núcleo de una sustancia ferromagnética y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad *H*, que orienta en cierto grado las moléculas magnéticas de dicha sustancia; lo que refuerza el campo con una inducción *B*. Un aumento de la intensidad de la corriente trae como consecuencia un aumento de *H*; lo que hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas lo que se ve reflejado en un nuevo aumento de la inducción. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente y con ella *H*, llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas y por mucho que se aumente la intensidad del campo, éste ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética».

En la Figura 5.15 también se ha incluido la curva de magnetización del aire, donde se observa un crecimiento pequeño pero constante de la inducción magnética alcanzada respecto a la intensidad del campo de la bobina.

5.3.7. Permeabilidad magnética

Se puede comprobar experimentalmente que, al introducir en el núcleo de una bobina una barra de hierro, se aprecia un notable aumento de las propiedades magnéticas de dicha bobina. Por esta razón, siempre que deseemos producir campos magnéticos intensos utilizaremos núcleos de hierro, como es el caso de los electroimanes.

Cuando se introduce en el núcleo de una bobina una sustancia ferromagnética, se aprecia un aumento de líneas de fuerza en el campo magnético. Si llamamos B_0 a la inducción magnética que produce el electroimán con un núcleo de aire y *B* a la inducción magnética conseguida al introducir una sustancia ferromagnética, tendremos que:

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

μ_r es el poder que posee la sustancia ferrromagnética de multiplicar las líneas de campo. A este parámetro se le conoce por el nombre de permeabilidad. En este caso, se trata de la **permeabilidad relativa** con respecto al aire o al vacío.

Este fenómeno lo podemos explicar valiéndonos de la teoría molecular de los imanes: «La bobina con núcleo de aire produce un número determinado de líneas de fuerza. Al introducir un trozo de hierro, éste se ve sometido a la acción de estas líneas de fuerza y sus moléculas magnéticas tienden a orientarse. El núcleo de hierro ahora es un imán temporal que refuerza la acción del campo magnético original».

En la práctica, es más usual utilizar el concepto de **permeabilidad absoluta** (μ). Ésta nos relaciona la intensidad de campo que produce la bobina (*H*) con el nivel de inducción magnética alcanzado al introducir una sustancia ferromagnética en el núcleo.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

O lo que es lo mismo: $B = \mu \cdot H$, donde se puede apreciar el poder multiplicador de la permeabilidad.

Las unidades de permeabilidad en el SI se dan en Henrios/metro (H/m).

Cada sustancia magnética tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Cuanto mayor es este coeficiente, mejores propiedades magnéticas poseerán estas sustancias. Como ya estudiaremos a continuación, la permeabilidad de los materiales no es constante y depende, sobre todo, de los niveles de inducción a los que son sometidos.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La **permeabilidad del aire o el vacío** en el SI es:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Con esta expresión relacionamos la permeabilidad absoluta con la relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Actividad resuelta 5.6

Determina la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo de hierro de un electroimán, si se ha medido un flujo magnético de 5 mWb. Los datos que se conocen son: $N = 500$ espiras; $I = 15$ A; longitud media del núcleo = 30 cm; superficie recta del núcleo = 25 cm^2.

Solución: Primero calculamos la inducción magnética:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0{,}005}{0{,}0025} = 2 \text{ T}$$

La intensidad de campo en la bobina es:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{500 \cdot 15}{0{,}3} = 25.000 \text{ Av/m}$$

La permeabilidad absoluta es entonces:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{25.000} = 0{,}00008 \text{ H/m}$$

La permeabilidad relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0{,}00008}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 64$$

Este último resultado nos indica que las líneas de campo son 64 veces mayor con el núcleo de hierro que con un núcleo de aire.

Actividad resuelta 5.7

Una bobina posee 300 espiras, una longitud de 24 cm y está bobinada sobre un cilindro de 35 cm^2 de sección. Determina la inducción (el flujo magnético alcanzado) si el núcleo es de aire y se hace circular por la bobina una corriente de 20 A.

Solución: Primero determinamos la intensidad del campo magnético generado por la bobina:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 20}{0{,}24} = 25.000 \text{ Av/m}$$

Aplicando el concepto de permeabilidad absoluta, tendremos que el nivel de inducción alcanzado con un núcleo de aire es:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25.000 = 0{,}03 \text{ T}$$

El flujo magnético para una sección transversal de la bobina de 35 cm^2 es:

$$\Phi = B \cdot S = 0{,}03 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 0{,}105 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 0{,}105 \text{ mWb}$$

5.4 Electroimanes

Un electroimán consiste en un núcleo de hierro rodeado de una bobina, que se imanta a voluntad cuando hacemos pasar una corriente eléctrica y se desimanta en el momento en que interrumpimos esta corriente (Figura 5.16).

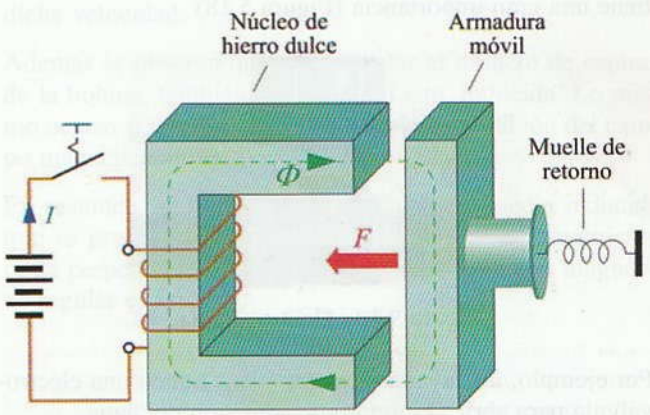


Figura 5.16.

Según como se disponga el núcleo de los electroimanes, éstos pueden ser de culata o de núcleo móvil (Figura 5.17). En los electroimanes el núcleo suele ser de un material ferromagnético con un bajo campo coercitivo, de tal forma, que sólo se imanta cuando las bobinas están siendo recorridas por una corriente eléctrica. En los dos tipos de electroimanes, la parte móvil es atraída hacia el núcleo mientras alimentamos la bobina con corriente eléctrica.

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Seguidamente, exponemos algunas de las más relevantes:

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

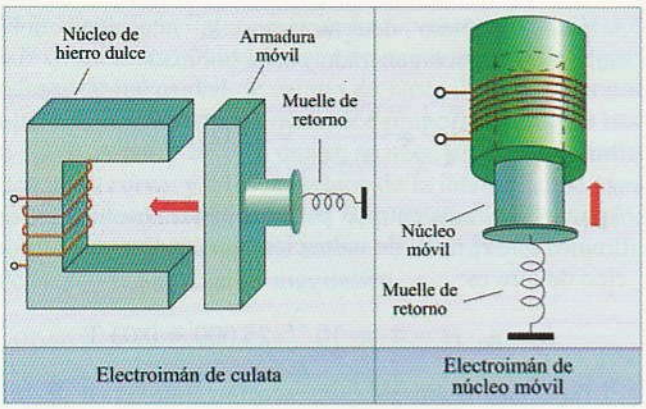


Figura 5.17. **Tipos de electroimanes.**

Frenos magnéticos: Se aplican, sobre todo, en ascensores, montacargas y grúas. Las zapatas de frenado se abren mediante un electroimán cuando existe una situación normal, es decir, cuando hay tensión en la red. Si por causa de una avería desaparece el suministro de energía eléctrica, las zapatas se cierran sobre la superficie de un tambor, con lo que frenan el sistema e impiden la caída al vacío de la carga.

Electroválvulas: La válvula abre o cierra el circuito hidráulico o neumático según sea o no alimentada la bobina del electroimán que lleva incorporada. La aplicación de las electroválvulas está muy extendida en todo tipo de aplicaciones industriales, donde la automatización de los fluidos tiene una gran importancia (Figura 5.18)

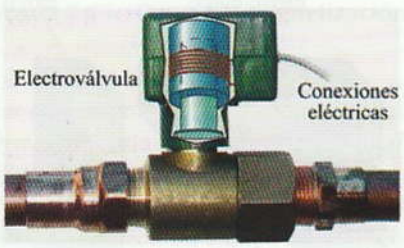


Figura 5.18. **Electroválvula.**

Por ejemplo, las lavadoras automáticas tienen una electroválvula para abrir el circuito de admisión del agua.

Timbres: Los timbres se utilizan para producir señales acústicas (Figura 5.19).

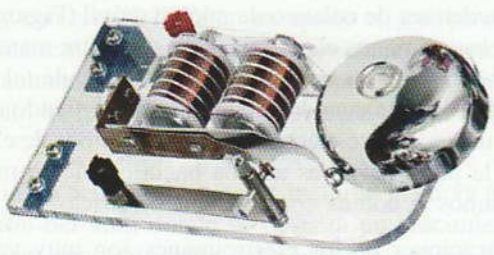


Figura 5.19. **Timbre.**

Sistemas que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos: Se utilizan para separar el acero y el hierro del carbón, piedras o minerales, así como para separar los residuos de acero de la arena de moldeo y las virutas y limaduras de los talleres mecánicos.

Relés y contactores: El contactor se podría definir como un interruptor de múltiples contactos que se puede accionar a distancia. El funcionamiento de este dispositivo es como sigue (Figura 5.20). Cuando cerramos el interruptor simple, la bobina es atravesada por la corriente eléctrica y genera un campo magnético que hace que el núcleo atraiga a la armadura, arrastrando consigo a los contactos móviles. El resultado es que estos contactos cambian de posición y se cierran.

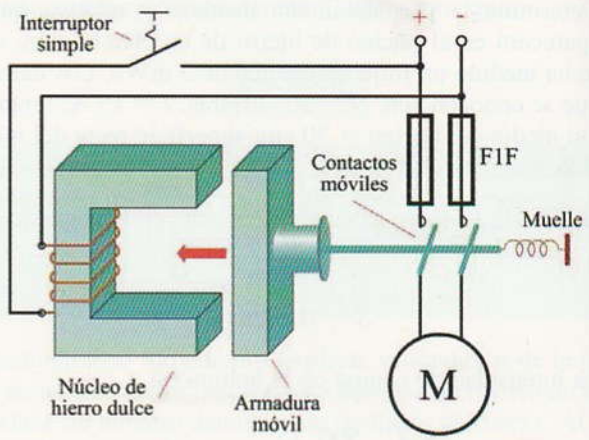


Figura 5.20. **Contactor accionando un motor eléctrico.**

La corriente eléctrica que necesita la bobina para crear el campo magnético necesario para que la armadura atraiga hacia sí al núcleo es muy pequeña en relación con la corriente que va a circular por los contactos principales que alimentan al motor. En la Figura 5.21 se muestra la constitución de un relé.

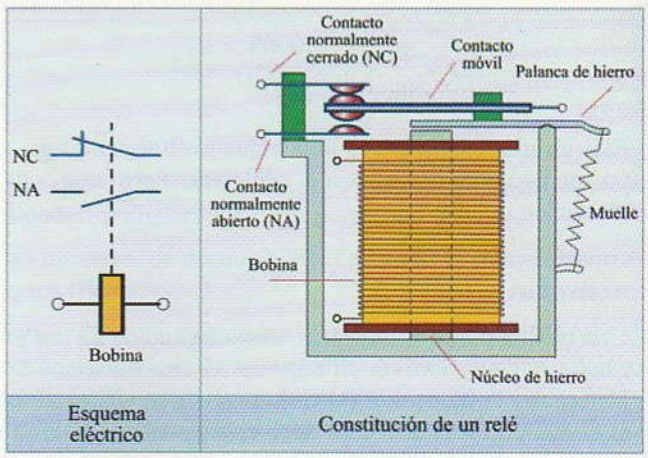


Figura 5.21. **Relé.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

5.5 Inducción electromagnética

Cuando nos referimos a la inducción electromagnética estamos hablando de «producción de electricidad por acción magnética»; es decir: «Cuando se mueve un conductor eléctrico en el seno de un campo magnético aparece una fuerza electromotriz que se muestra como una tensión eléctrica en los extremos de dicho conductor» (Figura 5.22).

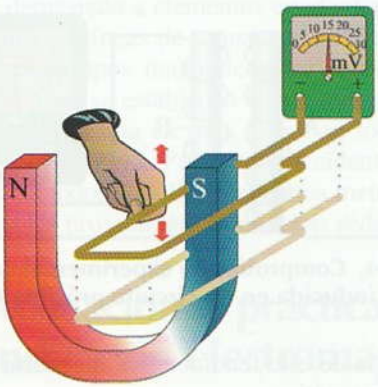


Figura 5.22. Al mover el conductor en el campo magnético del imán, se genera una f.e.m.

5.5.1. Experiencia de Faraday

Para realizar esta experiencia se necesita un imán, una bobina y un miliamperímetro de cero central (aparato de medida muy sensible, cuya aguja indicadora se mueve hacia un lado u otro de la escala, dependiendo del sentido de la corriente). La bobina la suspendemos entre los polos del imán, tal como se muestra en la Figura 5.23, de tal manera que pueda moverse y cortar las líneas de campo magnético.

Si movemos el conductor de tal manera que corte perpendicularmente a las líneas de campo, se puede observar que la aguja del miliamperímetro se desvía hacia un lado durante el movimiento, indicando el paso de una corriente en la bobina. Si ahora movemos el conductor en sentido contrario, la aguja del miliamperímetro se desvía también hacia el lado contrario.

De aquí se deduce que, cuando se mueven los conductores, cortando perpendicularmente las líneas de un campo magnético, se produce una f.e.m. inducida. Si se cierra el circuito, aparece una corriente eléctrica. También observamos que el sentido de esta corriente depende del movimiento relativo de los conductores respecto al campo magnético.

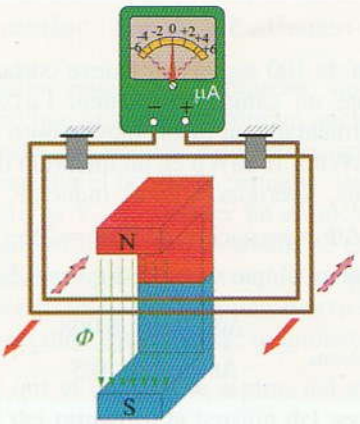


Figura 5.23. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

Si ahora movemos los conductores paralelamente a las líneas de campo (hacia arriba y hacia abajo según la Figura 5.23) se puede observar que el miliamperímetro no detecta el paso de corriente. También podemos observar que cuanto más rápido movamos la bobina, mayores son los valores de la corriente medida.

De aquí se deduce que sólo se produce f.e.m. mientras los conductores corten el campo magnético. Además la f.e.m. depende de la velocidad relativa de corte de los conductores respecto al campo magnético, y la f.e.m. aumenta con dicha velocidad.

Además se observa que, al aumentar el número de espiras de la bobina, también aumenta la f.e.m. inducida. Lo mismo ocurre si incrementamos el nivel de inducción del campo magnético.

En resumen, se puede decir que la f.e.m. media inducida que se produce en una bobina cuando en su movimiento corta perpendicularmente las líneas de un campo magnético regular es igual a:

$$E_{\text{inducida}} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Donde N es el número de espiras de la bobina y la expresión $\Delta\Phi/\Delta t$ nos indica la variación del flujo cortado por la bobina respecto al tiempo; es decir, lo rápido que varía el flujo magnético en los conductores.

Conviene indicar que se puede generar una f.e.m. inducida tanto si se mueven los conductores en el seno de un campo magnético fijo, como si lo que se mueve es el campo magnético y se dejan fijos los conductores. También se consigue una f.e.m. inducida en los conductores si se les aplica un campo magnético variable, por ejemplo, proveniente de una bobina a la que se le aplica corriente alterna.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 5.8

Una bobina de 100 espiras se mueve cortando perpendicularmente un campo magnético. La variación de flujo experimentado en dicho movimiento es uniforme y va de 2 mWb a 10 mWb en un intervalo de tiempo de 0,5 segundos. Averigua la f.e.m. inducida.

Solución: $\Delta\Phi$ = variación de flujo = 10 − 2 = 8 mWb

Δt = tiempo en el que varía el flujo = 0,5 s

$$E_{\text{inducida}} = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100\,\frac{0{,}008}{0{,}5} = 1{,}6\ \text{V}$$

La fórmula de la f.e.m. inducida media se puede expresar de otra forma. Para un conductor de longitud L que se desplaza perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de inducción B a una velocidad v, tenemos que:

$$E_{\text{inducida}} = BLv$$

E = f.e.m. media inducida en voltios.
B = Inducción magnética en teslas.
L = Longitud del conductor en metros.
v = Velocidad perpendicular en m/s.

Actividad resuelta 5.9

Un conductor se desplaza a una velocidad lineal de 5 m/s en el seno de un campo magnético fijo de 1,2 teslas de inducción. Determina el valor de la f.e.m. inducida en éste, si posee una longitud de 0,5 m.

Solución: $E = BLv = 1{,}2 \cdot 0{,}5 \cdot 5 = 3$ V

5.5.2. Sentido de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz

La ley de Lenz indica que: «El sentido de la corriente inducida en un conductor es tal que tiende a oponerse a la causa que la produjo» (principio general de acción y reacción).

5.5.3. Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo

Los campos magnéticos variables que desarrollan los conductores cuando son recorridos por corrientes variables pueden inducir fuerzas electromotrices, al atravesar otros conductores que se encuentren en su proximidad.

Para entender este fenómeno, podemos realizar una sencilla experiencia, que consiste en colocar dos bobinas muy próximas una de la otra, tal como se muestra en la Figura 5.24. En los extremos de la bobina B conectamos un galvanómetro de cero central. A su vez, en la bobina A conectamos primeramente un generador de C.C. Al cerrar el interruptor en la bobina A, se puede observar cómo el galvanómetro percibe el paso de una pequeña corriente por la bobina B que persiste sólo durante un pequeño período de tiempo. Si ahora abrimos el interruptor, podremos comprobar que el galvanómetro vuelve a detectar el paso de corriente, pero ahora en sentido contrario.

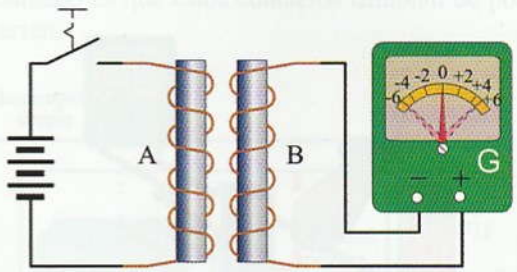


Figura 5.24. Comprobación experimental de la f.e.m. inducida en un circuito próximo.

La explicación de este fenómeno se encuentra en la inducción electromagnética.

Al cerrar el interruptor, por la bobina A aparece una corriente que tiende a crecer desde cero hasta su valor nominal, lo que origina en la misma un campo magnético variable y creciente. Al estar la bobina B muy próxima a la A, dicho campo magnético la recorre, produciéndose el principio de inducción electromagnética (conductores sometidos a la acción de un campo magnético variable) que da como resultado una fuerza electromotriz y una corriente eléctrica en la bobina B. Esta corriente sólo se produce mientras el campo magnético sea variable, es decir, mientras la corriente por la bobina A esté creciendo, hecho que ocurre sólo durante un pequeño período de tiempo.

Al abrir el interruptor, el proceso se repite, pero a la inversa. La corriente por la bobina A tiende a desaparecer, lo mismo que el campo magnético. En la bobina B aparece una f.e.m. de inducción mientras el campo magnético sea variable (en este caso decreciente). El galvanómetro detecta el paso de una corriente eléctrica. Pero en este caso, de sentido contrario al anterior, hecho que se explica fácilmente con la ley de Lenz.

Si sustituimos el generador de C.C., por uno de C.A. y el galvanómetro por un voltímetro de C.A., al cerrar el interruptor podremos observar que el voltímetro conectado a la bobina B indica una determinada tensión. Si ahora sustituimos la bobina B por una de más espiras, se puede observar que la tensión de salida aumenta.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La explicación de esta experiencia hay que volver a buscarla en la inducción electromagnética. Ahora la bobina A es recorrida por una corriente variable, lo que produce, a su vez, un campo variable que atraviesa en todo momento a la bobina B. En consecuencia, en esta bobina se produce constantemente una f.e.m. de inducción. Si aumentamos el número de espiras en la bobina B, la fuerza electromotriz inducida aumenta.

Gracias a este principio funcionan los transformadores eléctricos, que estudiaremos más adelante. Además con él podemos dar explicación a muchos fenómenos que aparecen en torno a las corrientes y campos magnéticos variables. Así, por ejemplo, se puede entender que es peligroso aproximarse demasiado a elementos conductores que estén en las cercanías de líneas de transporte de alta tensión, ya que los fuertes campos magnéticos variables producidos por sus conductores se establecen en un determinado radio de acción e inducen una elevada f.e.m. en todos aquellos conductores que atraviesa. Para evitar accidentes, conviene conectar a tierra todos aquellos elementos metálicos que se encuentren en las proximidades de dichas redes.

5.5.4. Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética

La principal aplicación de la inducción electromagnética es, sin duda, la producción de energía eléctrica en grandes cantidades mediante los alternadores. Además, gracias a este fenómeno funcionan los transformadores eléctricos.

Existen muchas más aplicaciones, como por ejemplo, los relés diferenciales, pinza amperimétrica, hornos de inducción, etc.

El alternador

Por ejemplo, en un alternador trifásico con un par de polos en el rotor, una rueda polar con un fuerte campo magnético gira a 3.000 revoluciones por minuto (50 vueltas por segundo) e induce en las tres bobinas del estator una tensión alterna trifásica de 50 Hz que se transporta y distribuye hasta los centros de consumo.

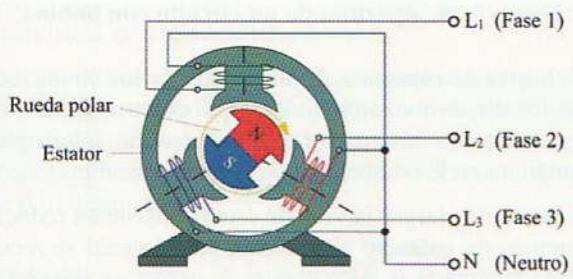


Figura 5.25. **Alternador trifásico.**

El transformador

Un transformador posee dos bobinados: uno primario y otro secundario que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas (Figura 5.26). Al conectar el bobinado primario, de N_1 espiras, a una tensión alterna V_1, se produce en el núcleo magnético un flujo variable (Φ). Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del bobinado secundario, por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá de su número de espiras.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que el del primario, la tensión del secundario también será mayor. El mismo razonamiento se puede hacer para un transformador reductor.

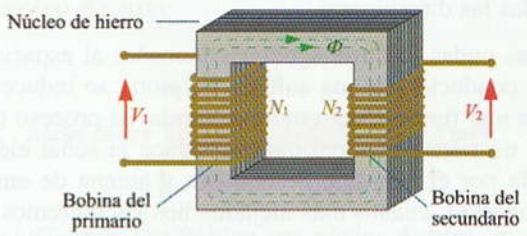


Figura 5.26. **Transformador eléctrico.**

Sistemas de transmisión y recepción de señales de radio, vídeo y telefonía móvil

Todos estos sistemas consiguen transmitir la información gracias a la producción de campos magnéticos de alta frecuencia (del orden de kHz y MHz para sistemas de radio y de algunos GHz para la telefonía móvil). Estas señales electromagnéticas se recogen con facilidad a larga distancia por los receptores gracias al principio de inducción electromagnética. Cuanto mayor sea la frecuencia, la señal podrá transmitirse a más distancia sin que su intensidad de origen sea muy elevada, tal como ocurre con la telefonía móvil que emplea señales en torno a los 2 GHz ($2 \cdot 10^9$ Hz) de frecuencia.

En la Figura 5.27 se muestra de forma simplificada cómo sería el sistema de emisión y recepción de un sistema de comunicación por radio.

En este caso la emisora se encarga de recoger la información a transmitir (señales de audio transformadas en señales eléctricas de una determinada frecuencia) y mediante circuitos de modulación adecuados, genera una señal de alta frecuencia que es aplicada a la antena mediante un transformador.

Cuando la corriente alterna de alta frecuencia recorre el conductor de la antena, se produce un campo electromag-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

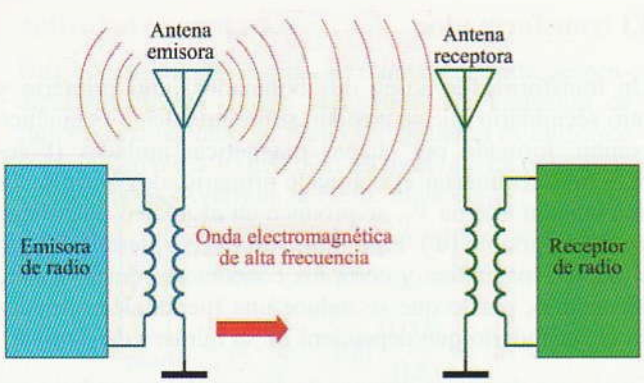


Figura 5.27. Sistema de comunicación por radio.

nético variable de la misma frecuencia. Esto hace que se produzca, a su vez, una onda electromagnética que se radia en todas las direcciones.

Si estas ondas electromagnéticas lanzadas al espacio cortan el conductor de una antena receptora, se induce en la misma una fuerza electromotriz (similar al proceso que se da en un transformador) que reproduce la señal eléctrica emitida por el conjunto de emisora y antena de emisión. Por supuesto, cuanto más alejados nos encontremos de la antena de emisión, más pequeña será la señal recibida. Esta señal suele ser del orden de los microvoltios.

5.6 Autoinducción. Bobinas

Seguro que habrás podido observar en alguna ocasión que, al abrir los contactos de un interruptor, aparece entre los mismos una *chispa de ruptura*. Esta chispa es mucho más fuerte en el caso de que el interruptor corte la corriente que alimenta a una bobina (motores, transformadores, etc.). Estos fenómenos tienen que ver fundamentalmente con la *autoinducción*.

La autoinducción, como su palabra indica, significa inducirse a sí misma f.e.m. Cuando por una bobina circula una corriente eléctrica que es variable, ésta genera, a su vez, un campo magnético también variable que corta a los conductores de la propia bobina. Esto origina en ellos una f.e.m. inducida, llamada f.e.m. de autoinducción que, según la ley de Lenz, tendrá un sentido tal que siempre se opondrá a la causa que la produjo.

Según esto, al cerrar el interruptor de un circuito que alimenta una bobina (Figura 5.28), aparece una corriente eléctrica por la bobina que tiene que aumentar de cero hasta su valor nominal en un tiempo relativamente corto. Esta variación de corriente por la bobina genera en sus conductores un flujo magnético creciente que, al cortar a los mismos, provoca una f.e.m. de autoinducción. El sentido de esta f.e.m. es tal que impide que el flujo se establezca y, por tanto, la intensidad sufre una oposición y se retrasa (la tensión provocada por la autoinducción tiende a restar los efectos de la tensión de la batería). Cuando la intensidad se estabiliza, la f.e.m. de autoinducción desaparece y en la bobina aparece el flujo correspondiente.

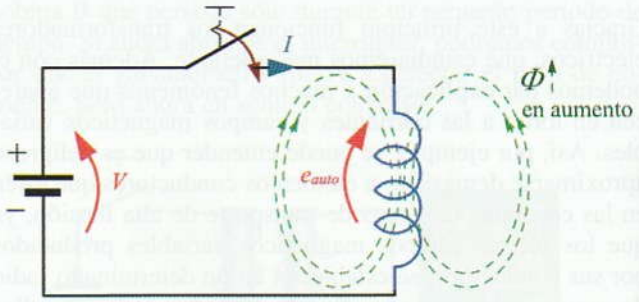


Figura 5.28. Cierre de un circuito con bobina.

Al abrir el interruptor (Figura 5.29), el flujo magnético que abraza a la bobina tiende a desaparecer, lo que origina una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que no deja que el flujo ni la corriente desaparezca (la f.e.m. de autoinducción cambia de sentido y tiende a sumarse a la tensión de la batería). La tensión que aparece entre los contactos suele ser tan grande que provoca una chispa de ruptura entre los mismos. El valor de la f.e.m de autoinducción se hace mayor al aumentar la velocidad con que abrimos los contactos del interruptor, y cuanto mejor sea la capacidad de la bobina de generar flujo magnético.

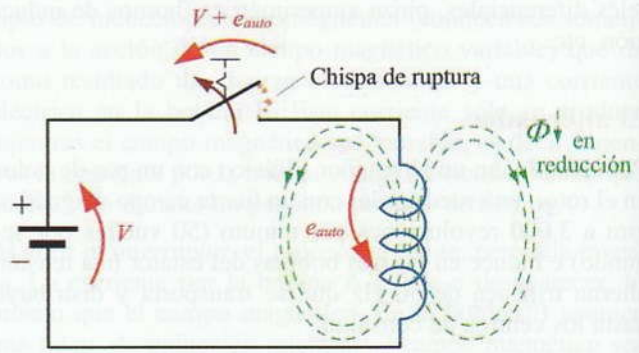


Figura 5.29. Apertura de un circuito con bobina.

Las chispas de ruptura acortan la vida de los contactos de todos los dispositivos que tengan que cortar un circuito en carga, tal como interruptores de maniobra, interruptores automáticos, relés de contactos, contactores, etc.

Una forma de alargar la vida de éstos consiste en reducir la resistencia de contacto al mínimo, para lo cual se recubre de plata la superficie de contacto. A su vez, se procura que el arco formado en la apertura se estire rápidamente con la

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

intención de aumentar el aislamiento entre los contactos, además de que se consigue que se enfríen en poco tiempo. Esto último se consigue construyendo los dispositivos de apertura con muelles de recuperación.

En cierta forma, una bobina se puede comparar a un volante de inercia. Cuando el flujo magnético tiende a crecer en ella, se carga de energía magnética. Al cortar la corriente, el flujo tiende a desaparecer, devolviendo la energía acumulada.

5.6.1 Coeficiente de autoinducción

La f.e.m. de autoinducción de una bobina depende de la rapidez con que cambia su flujo, es decir:

$$e_{auto} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Ahora bien, dependiendo de la capacidad de generar flujo de la bobina, esta f.e.m. tendrá un valor u otro. El coeficiente de autoinducción de una bobina nos dice la capacidad que tiene una bobina de generarse a sí misma f.e.m. de autoinducción.

$$e_{auto} = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

L = coeficiente de autoinducción en henrios (H).

En esta expresión se puede apreciar que la f.e.m. de autoinducción aumenta con el coeficiente de autoinducción y con la rapidez con que varía la intensidad de corriente.

El coeficiente de autoinducción de una bobina se puede expresar como la relación entre el flujo magnético generado por ella y la intensidad de corriente que ha sido necesaria aplicar. Para un número de espiras N, tendremos que:

$$L = N\frac{\Phi}{I}$$

Actividad resuelta 5.10

Calcula el valor de la f.e.m. de autoinducción que desarrollará una bobina con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios, si se le aplica una corriente que crece regularmente desde cero hasta 10 A en un tiempo de 0,01 segundos.

Solución: $e_{auto} = L\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0{,}05\,\frac{10}{0{,}01} = 50\ \text{V}$

Actividad resuelta 5.11

Una bobina que posee 500 espiras produce un flujo magnético de 10 mWb cuando es atravesada por una corriente de 10 amperios. Determina su coeficiente de autoinducción.

Solución: $L = N\frac{\Phi}{I} = 500\,\frac{0{,}01}{10} = 0{,}5\ \text{H}$

El coeficiente de autoinducción de una bobina depende de sus características constructivas. Se consiguen bobinas con coeficientes de autoinducción altos con núcleos de alta permeabilidad y gran número de espiras.

Coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de aire

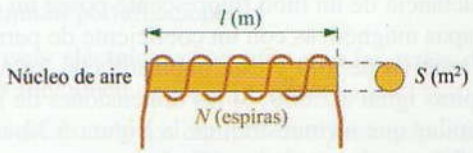


Figura 5.30. **Bobina con núcleo de aire.**

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

L = Coeficiente de autoinducción (H).
μ_0 = Permeabilidad del vacío ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$).
N = Número de espiras de la bobina.
S = Sección de la bobina (m^2).
l = Longitud de la bobina (m).

Coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de hierro

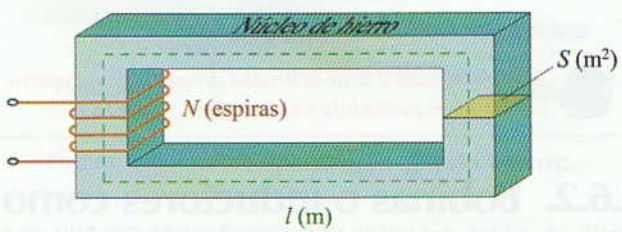


Figura 5.31. **Bobina con núcleo de hierro.**

En este caso la bobina conseguirá un aumento significativo de su coeficiente de autoinducción debido al aumento de la permeabilidad del núcleo. Para un núcleo de hierro con una

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

permeabilidad relativa μ_r, el coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de hierro se calcula así:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$$

Actividad propuesta 5.1

Calcula el coeficiente de autoinducción de una bobina con núcleo de aire de la que se conocen los siguientes datos: longitud de la bobina = 10 cm; número de espiras = 1.000; diámetro de espira = 3 cm.

Actividad propuesta 5.2

La reactancia de un tubo fluorescente posee un núcleo de chapas magnéticas con un coeficiente de permeabilidad relativo de 100 y está bobinada con un número de espiras igual a 2.000. Si las dimensiones de la misma son las que se muestran en la Figura 5.32, calcula el coeficiente de autoinducción de la misma.

Calcula el valor de la f.e.m. de autoinducción que desarrollará esta bobina, si se le aplica una corriente que crece regularmente desde 0 hasta 15 A en un tiempo de 0,001 segundos.

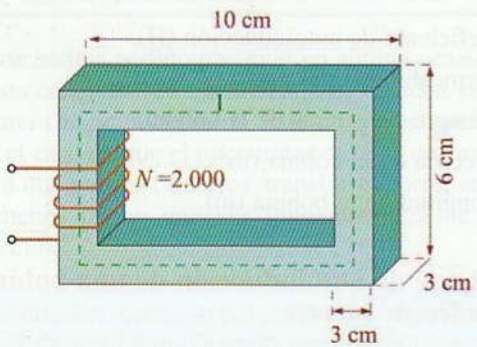


Figura 5.32.

** *La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

5.6.2. Bobinas o inductores como componentes electrónicos

Estos componentes son muy utilizados en los circuitos electrónicos, siendo de gran utilidad para la fabricación de bobinas de choque en radiofrecuencia. Su coeficiente de autoinducción suele ser del orden del microhenrio (μH). Al igual que las resistencias y los condensadores, las bobinas pueden ser fijas o variables.

Por otro lado, es muy habitual encontrar bobinas que utilizan ferritas como núcleo en circuitos que trabajan con altas frecuencias. Dado que la ferrita está construida con materiales cerámicos, no conduce la electricidad, lo que elimina prácticamente las pérdidas que se pudiesen ocasionar por corrientes parásitas autoinducidas en el núcleo por los conductores de la propia bobina.

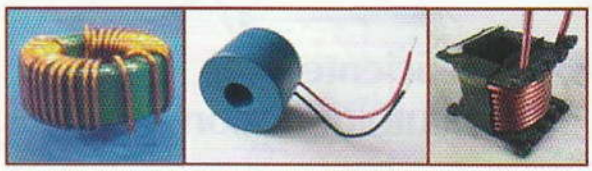


Figura 5.33. **Inductores.**

5.7 Compatibilidad electromagnética

Hoy en día se fabrican multitud de dispositivos eléctricos y electrónicos que producen emisiones electromagnéticas de alta frecuencia. Estos campos electromagnéticos se propagan con facilidad por el aire, por sus envolventes, por los conductores eléctricos o de transmisión de datos. Debido al fenómeno de la inducción electromagnética, estos campos inducen señales eléctricas en otros equipos cercanos que pueden llegar a pertubar el normal funcionamiento de los mismos, dando lugar a lo que se conoce como **interferencias electromagnéticas** (conocido también como **EMI** por sus siglas en inglés *ElectroMagnetic Interference*).

Existen multitud de ejemplos de interferencias, como el ruido al sintonizar una emisora de radio, el mal funcionamiento ocasional del receptor de televisón, el disparo aleatorio de una alarma, etc.

Para que se produzca la interferencia electromagnética tiene que existir la fuente que lo origine, un receptor o víctima que se vea afectado por ella y, por último, un medio a través del cual se propague la interferencia y se produzca así la perturbación (Figura 5.34).

Figura 5.34. **Recorrido de la perturbación electromagnética.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Ejemplos de fuentes de perturbaciones son:

- Rayos.
- Cortocircuitos.
- Conexión a tierra imprevista.
- Descargas electrostáticas.
- Emisores de radiodifusión.
- Emisores de televisión.
- Walkie Talkie.
- Teléfonos móviles.
- Radares.
- Todos los sistemas de activación y desactivación de una señal eléctrica tales como: contactores, relés, onduladores, fuentes de alimentación conmutada, sistemas de encendido de motores de explosión, colectores de los motores de C.C., reguladores electrónicos.
- Lámparas de descarga y fluorescentes.
- Equipos que utilizan relojes (PC, PLC).

Con el objeto de reducir la contaminación electromagnética capaz de perturbar el funcionamiento de algún dispositivo eléctrico o electrónico y conseguir de este modo una buena **compatibilidad electromagnética (CEM)**, hay que suprimir o al menos minimizar la influencia de alguno de estos tres factores.

A este respecto, el Real Decreto 1580/2006 de 22 de diciembre de 2006, siguiendo el Informe Técnico de la Comisión Electrotécnica Internacional, intenta dar solución a todo lo relativo con la compatibilidad electromagnética a la que define como:

La capacidad de que un equipo funcione de forma satisfactoria en su entorno electromagnético y sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables para otros equipos en ese entorno.

El objetivo de esta normativa es conseguir que un aparato no perturbe el correcto funcionamiento de otros equipos a través de la emisión de interferencias electromagnéticas (emisividad), y que, a su vez, el funcionamiento de éste no se vea afectado por cualquier emisión producida por ningún otro aparato (suceptibilidad, inmunidad). De aquí surgen los siguientes conceptos:

Límite de emisión: nivel normalizado de emisión que un dispositivo no debe superar.

Nivel de susceptibilidad: nivel de perturbación a partir del cual un dispositivo o un sistema empieza a funcionar mal.

Nivel de inmunidad: nivel normalizado de perturbación que puede soportar un dispositivo o un sistema.

Esto significa que:

- El nivel de inmunidad de cada aparato es tal que su entorno electromagnético no lo perturba.
- Su nivel de emisión de perturbaciones debe ser lo suficientemente bajo como para no perturbar los aparatos situados en su entorno electromagnético.

Existen tres posibilidades de eliminar las interferencias electromagnéticas:

- Suprimir la emisión en la fuente.
- Hacer el camino de acoplamiento poco efectivo.
- Hacer el receptor menos sensible a las emisiones.

Para poder abordar con éxito la reducción y eliminación de las interferencias electromagnéticas se hace necesaria la coordinación de los diferentes sectores, como por ejemplo:

- **Fabricantes:** procurando que los equipos sean inmunes y no emitan perturbaciones.
- **Empresas eléctricas:** haciendo que las redes de distribución funcionen de forma estable.
- **Usuarios:** usando los equipos de forma responsable.
- **Administración Pública**: publicando normas, como la Directiva Europea 2004/108/CE que establece los requisitos esenciales que se deben someter los aparatos e instalaciones electrónicas.

Así, por ejemplo, una forma sencilla de proteger los equipos y los conductores de conexión es blindarlos o apantallarlos con superficies conductoras y luego poner a tierra esos blindajes, consiguiendo así que las corrientes inducidas por los campos electromagnéticos fluyan a través de las superficies conductoras externas a tierra evitando los efectos de las mismas sobre los equipos que están en su interior.

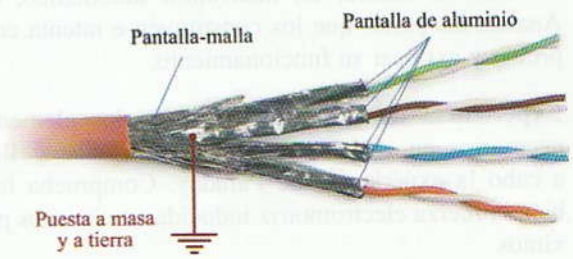


Figura 5.35. Cable apantallado puesto a tierra.

La sustitución de conductores de cobre por cables de fibras ópticas para la transmisión de señales ha supuesto un gran avance en el proceso de reducción de las perturbaciones electromagnéticas, ya que estos dispositivos transportan la información en forma de luz, que es totalmente inmune a las radiaciones electromagnéticas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

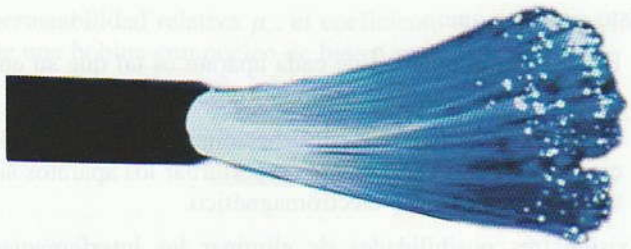


Figura 5.36. El cable de fibra óptica es totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas.

La fibra óptica se compone de un hilo muy fino de vidrio o material plástico transparente, por el que se transmiten señales luminosas que contiene los datos a transmitir. La fuente de luz puede ser láser o un LED. Su principal aplicación se encuentra en las telecomunicaciones (telefonía, Internet, televisión, etc.), ya que es posible transmitir a la vez cantidades masivas de datos a una gran distancia.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

5.1 Propiedades magnéticas de los imanes y electroimanes. Consigue los materiales necesarios para la observación del espectro magnético de imanes y electroimanes, así como la comprobación de las propiedades magnéticas más significativas (atracción y repulsión entre imanes, polaridad de los campos magnéticos generados por conductores y bobinas, etc.). Comprueba también cómo se multiplican las líneas de campo, al introducir en una bobina con núcleo de aire una sustancia ferromagnética.

5.2 Dispositivos electromagnéticos. Consigue diferentes dispositivos que funcionen gracias al electromagnetismo, como, por ejemplo, un contactor, una electroválvula, un timbre, un interruptor automático, etc. Analiza las partes que los constituyen e intenta comprobar y explicar su funcionamiento.

5.3 Experiencia de Faraday. Consigue los elementos necesarios en el laboratorio de electrónica y lleva a cabo la experiencia de Faraday. Comprueba también la fuerza electromotriz inducida en circuitos próximos.

AUTOEVALUACIÓN

5.1 ¿Cómo se consigue aumentar el nivel de inducción magnética en una bobina con núcleo de aire?

A ❑ Introduciendo una sustancia ferromagnética en el núcleo.

B ❑ Sólo es posible aumentar la inducción magnética aumentando la intensidad por la bobina.

5.2 Para la construcción de núcleos de electroimanes, transformadores y motores empleamos preferentemente:

A ❑ Acero.

B ❑ Ferrita.

C ❑ Hierro.

5.3 Para la construcción de núcleos de bobinas de radiofrecuencia empleamos preferentemente:

A ❑ Acero.

B ❑ Ferrita.

C ❑ Hierro.

5.4 Si un material ferromagnético posee una permeabilidad relativa de 100, calcula su permeabilidad absoluta.

5.5 Determina la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo ferromagnético de una bobina, si se ha medido un flujo magnético de 15 mWb. Los datos que se conocen son: $N = 1.000$ espiras, $I = 20$ A, longitud media del núcleo = 10 cm, superficie recta del núcleo = 5 cm^2.

5.6 Una bobina posee 500 espiras, una longitud de 25 cm y está bobinada sobre un cilindro de 15 cm^2 de sección. Determina la inducción y el flujo magnético alcanzado si el núcleo es de aire y se hace circular por la bobina una corriente de 1 A.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

5.7 El núcleo rectangular de la Figura 5.34 tiene una sección transversal de 25 cm^2. El número de espiras de la bobina es de 300 y la corriente de 10 A. Calcula la intensidad del campo magnético, así como el flujo que produce la bobina, si se sabe que la permeabilidad absoluta del núcleo es de $8 \cdot 10^{-5}$ H/m.

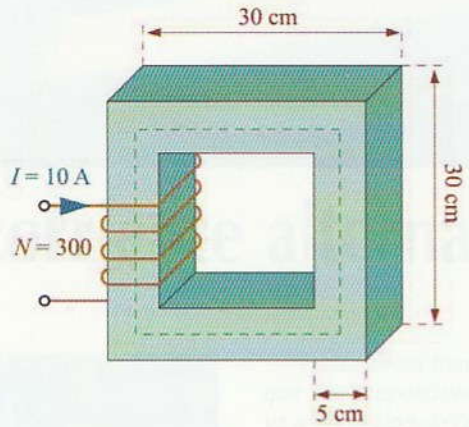


Figura 5.34.

5.8 Un núcleo de acero con una inducción de 1,2 T posee una permeabilidad de 4×10^{-3} H/m. La longitud de la bobina es de 25 cm y la superficie recta del núcleo es de 5 cm^2. Calcula el flujo magnético, la intensidad de campo y la fuerza magnetomotriz.

5.9 Calcula el valor del coeficiente de autoinducción de una bobina de 100 espiras arrollada en un núcleo cilíndrico de 1 cm de diámetro y 50 cm de largo. Realiza el cálculo para un núcleo de aire y un núcleo de una sustancia ferromagnética con una permeabilidad relativa de 10.

AMPLIACIÓN

5.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 5*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

5.2 Busca fabricantes y distribuidores de bobinas y analiza las características de estos componentes.

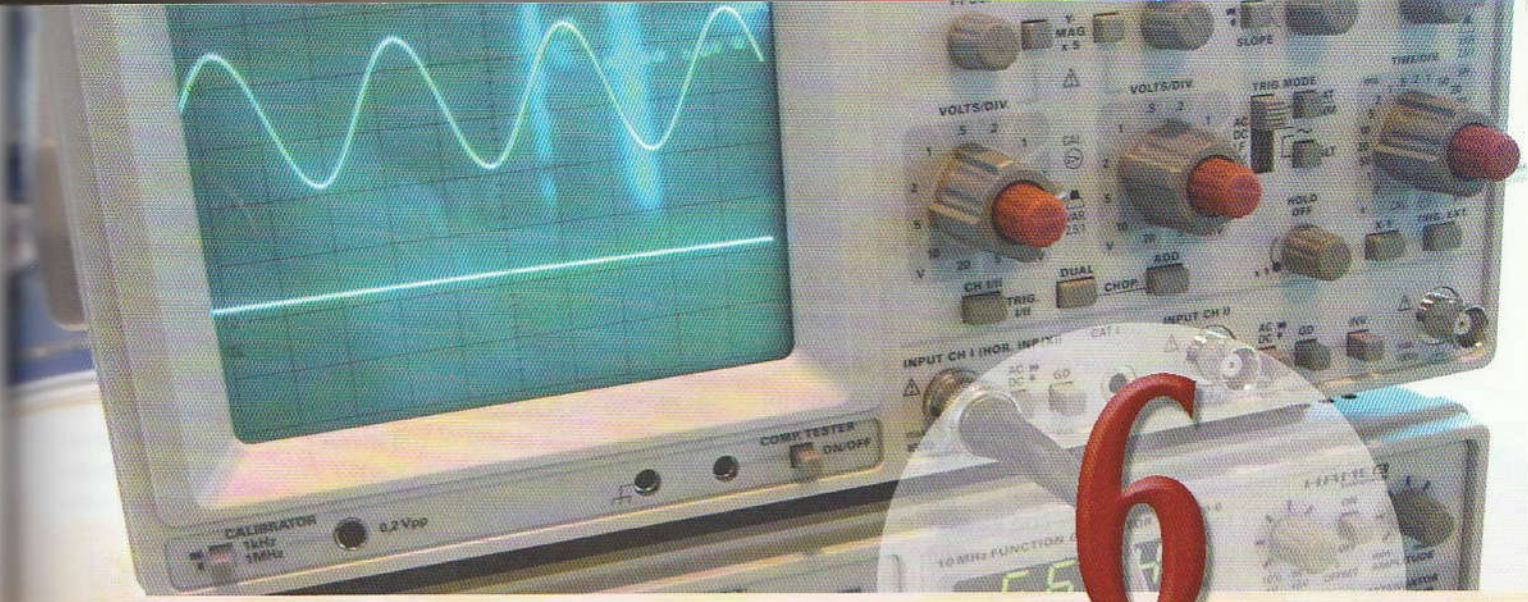
5.3 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

5.4 Busca en Internet la normativa relativa a la compatibilidad electromagnética y estudia sus fundamentos y su campo de aplicación.

© Ediciones Paraninfo

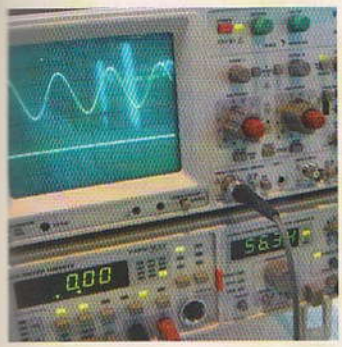
WWW.AUTODIDACTA.INFO

WWW.AUTODIDACTA.INFO



6

La corriente alterna



Hasta ahora hemos utilizado fuentes de alimentación o generadores (pilas y acumuladores) que nos proporcionaban corriente continua (C.C.) para alimentar los circuitos. De hecho, este va a ser el tipo de corriente con el que se va a proporcionar energía a la mayor parte de los circuitos electrónicos que se construyen en la práctica.

Sin embargo, la corriente que se produce en las centrales eléctricas y la que se consume en el sector doméstico e industrial es alterna (C.A.). Gracias a las fuentes de alimentación, que estudiaremos más adelante, es posible convertir este tipo de corriente en C.C.

Además, existen multitud de circuitos electrónicos que trabajan con señales eléctricas de tipo variable, como por ejemplo: osciladores, amplificadores de audio y vídeo, sistemas de comunicaciones por radio, etc.

El estudio de la C.A. es bastante más complejo que el de la C.C., ya que, al ser variable la corriente, van a aparecer una serie de fenómenos que nos obligarán a tratar las magnitudes eléctricas como vectores. La utilización de la trigonometría y de los números complejos nos ayudará a resolver la mayor parte de los problemas que se nos presenten.

Contenido

6.1. **Producción de una corriente alterna**
6.2. **Valores característicos de la C.A.**
6.3. **Receptores elementales en corriente alterna**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Definir los procesos que se dan en la generación de una corriente alterna.
- Identificar los valores fundamentales de una C.A, así como seleccionar el instrumento de medición adecuado para su medida.
- Manejar adecuadamente el osciloscopio para medir las magnitudes asociadas a una C.A. senoidal.
- Explicar los procesos que se dan en un circuito de C.A., al conectar resistencias, bobinas y condensadores.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

6.1 Producción de una corriente alterna

Dado que la C.A. sigue las variaciones de la función senoidal conviene que, antes de abordar su estudio, realices un pequeño repaso a los siguientes conocimientos de matemáticas: funciones trigonométricas (seno, coseno y tangente), ángulos complementarios, la función senoidal, variaciones de las funciones trigonométricas con el ángulo, representación vectorial y operaciones con vectores.

*** En www.paraninfo.es se ha incluido un pequeño resumen de los conceptos básicos de trigonometría con algunos ejemplos prácticos que te ayudarán a entender mejor estos contenidos.*

En la Figura 6.1 se muestra el aspecto de un alternador elemental. Consta de un campo magnético fijo producido por un imán, dentro del cual se hace girar un conductor eléctrico en forma de espira. Al cortar los conductores el campo magnético en su movimiento giratorio, se produce en ellos una fuerza electromotriz de inducción que se muestra como una tensión V en los extremos de la espira. Para poder conectar dichos extremos a un receptor eléctrico, es necesario utilizar un par de anillos conductores unidos eléctricamente a los extremos situados en el eje de giro de la espira. Los receptores se conectan a través de unas escobillas fijas de grafito que, mediante frotamiento, consiguen un aceptable contacto eléctrico con los anillos colectores.

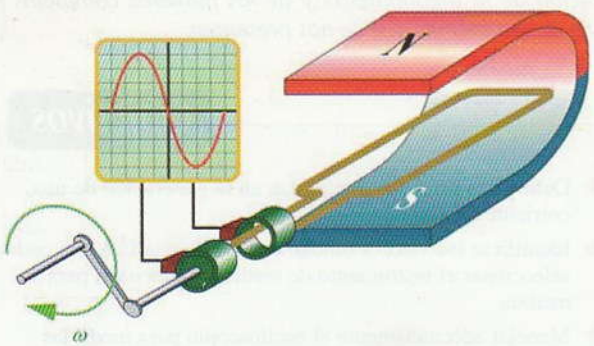


Figura 6.1. Alternador elemental.

Se puede comprobar que la tensión que aparece en los terminales de la espira es variable y tiene la forma de una senoide, tal como se muestra en la Figura 6.2.

Una corriente alterna senoidal se caracteriza porque el valor de la corriente y de la tensión cambia de valor e incluso de sentido a cada instante, siguiendo un ciclo repetitivo según la función senoidal.

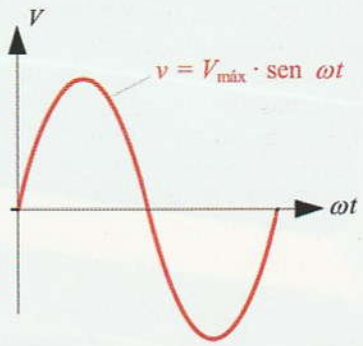


Figura 6.2. Representación de una tensión senoidal.

El valor instantáneo de la tensión es:

$$v = V_{máx} \operatorname{sen} \omega t$$

Donde: $V_{máx}$ es el valor más alto que alcanza la tensión, ω es la velocidad angular que suministra el alternador y t es el tiempo.

Para poder comprender mejor estas variables vamos a estudiar cómo se consigue generar esta forma de onda senoidal mediante un alternador elemental como el de la Figura 6.1.

La espira gira en el seno de un campo magnético a una cierta velocidad angular ω, que la mediremos en radianes por segundo (Figura 6.3).

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

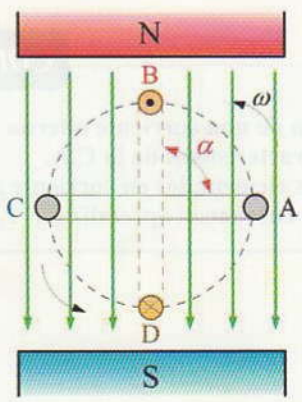


Figura 6.3. Espira que gira dentro de un campo magnético.

La velocidad angular ω nos indica el ángulo α girado por la espira en la unidad de tiempo.

En su giro los conductores de la espira cortan el campo magnético, por lo que se genera en ellos una f.e.m. inducida. Si observamos atentamente las distintas posiciones que

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

toma la espira respecto al campo magnético, podremos comprobar que el corte de ésta respecto al campo magnético no siempre es perpendicular. Es más, sólo se produce ese caso en los puntos B y D. En los puntos A y C los conductores se mueven paralelamente al campo magnético, por lo que aquí la f.e.m. es cero. Al moverse el conductor entre cualquiera de estos puntos, aparece un ángulo de corte que está entre 0° y 90°, por lo que la f.e.m. generada estará entre los valores cero y máximo, dependiendo del seno del ángulo de giro (Figura 6.4).

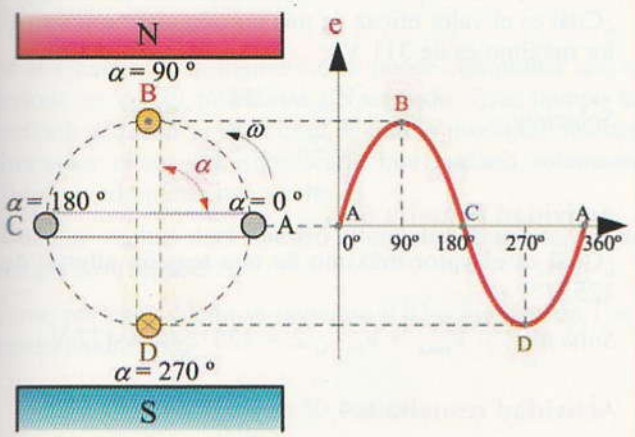


Figura 6.4. Al girar la espira se produce una tensión senoidal.

De esta forma, el valor instantáneo de la f.e.m. en el conductor lo podemos expresar así:

$$e = E_m \cdot \operatorname{sen} \omega t$$

A ω se la conoce por el nombre de pulsación de la corriente y se expresa en radianes/segundo.

La f.e.m. sigue los cambios de la función senoidal, tal como se puede comprobar en la Figura 6.5.

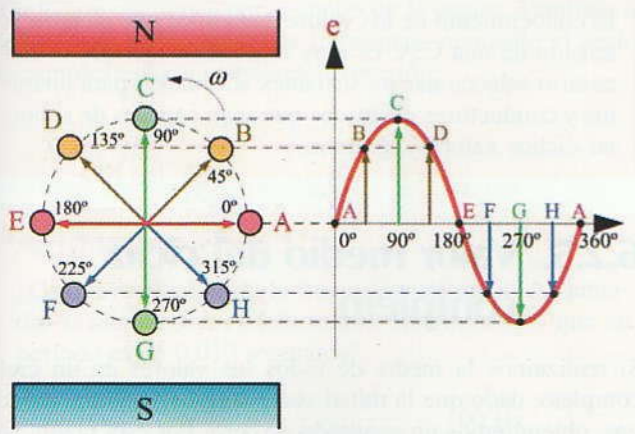


Figura 6.5. Generación de una f.e.m. senoidal.

Punto **A**: El conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, sen $0° = 0$ y, por tanto, $e = 0$.

Punto **B**: El conductor se mueve con un ángulo de 45° y la fuerza electromotriz alcanza un valor intermedio: $e = E_{máx} \operatorname{sen} 45°$.

Punto **C**: El ángulo es de 90°, se alcanza el valor máximo de la f.e.m.: $e = E_{máx} \operatorname{sen} 90° = E_{máx}$.

Punto **D**: El ángulo es de 135° y la f.e.m. alcanza el mismo valor que en el punto B.

Punto **E**: El ángulo es de 180° y el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, por lo que $e = 0$.

Punto **F**: Se invierte el sentido del movimiento del conductor y, con él, el de la f.e.m.

Punto **G**: Se alcanza el valor máximo negativo: $e = E_{máx} \operatorname{sen} 270° = -E_{máx}$.

Punto **H**: Se realiza una vuelta completa del conductor y con ella se cubre un ciclo completo.

6.2 Valores característicos de la C.A.

Al representar en un gráfico la tensión que aparece en un alternador en función del tiempo o del ángulo de giro, aparece una curva que se conoce con el nombre de senoide. Esto es así porque la tensión queda en función del seno del ángulo α de giro. Para estudiar todos los valores que se dan en una tensión senoidal, vamos a tomar como ejemplo una C.A. como la que disponemos en nuestras viviendas, de 230 V y 50 ciclos por segundo de frecuencia. En la Figura 6.6 se muestra el aspecto que presentaría ésta en la pantalla de un osciloscopio.

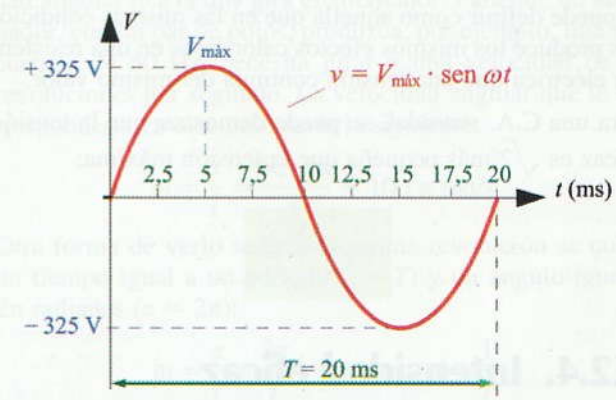


Figura 6.6. Representación de una C.A. senoidal industrial.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

6.2.1. Valor instantáneo

Es el valor que toma la tensión en cada instante del tiempo siguiendo la función senoidal:

$$v = V_{máx} \operatorname{sen} \omega t$$

En el ejemplo de la Figura 6.6 existen todos aquellos valores instantáneos comprendidos entre 0 y 325 V y entre 0 y −325 V.

Actividad resuelta 6.1

¿Cuál sería la tensión instantánea del ejemplo de la Figura 6.6 para un ángulo de giro de 30° del alternador elemental?

Solución: Como $\omega t = \alpha$ $v = 325 \operatorname{sen} 30^\circ = 162{,}5$ V

6.2.2. Valor máximo de la tensión

La tensión senoidal alcanza diferentes valores según la posición relativa de los conductores respecto al campo magnético. Varía a cada instante, de tal forma que por cada ciclo es dos veces nula y dos veces máxima (pero de sentido opuesto $+V_{máx}$ y $-V_{max}$). Se denomina valor máximo al mayor de todos ellos y que en el gráfico se da en las crestas de la senoide. En nuestro ejemplo este valor es de 325 V.

6.2.3. Tensión eficaz

Dado que la tensión cambia constantemente (en nuestro ejemplo desde 0 V a 325 V), se hace necesario determinar un valor intermedio que represente la tensión para realizar los cálculos y medidas, nos referimos a la tensión eficaz. En nuestro ejemplo, la tensión eficaz es de 230 V y es la que mide un voltímetro de C.A. La tensión eficaz también se puede definir como aquella que en las mismas condiciones produce los mismos efectos caloríficos en una resistencia eléctrica que una tensión continua del mismo valor.

Para una C.A. senoidal, se puede demostrar que la tensión eficaz es $\sqrt{2}$ más pequeña que la tensión máxima:

$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$$

6.2.4. Intensidad eficaz

Igual que ocurre con la tensión, la intensidad de la corriente también varía según una función senoidal, siendo dos veces nula y dos veces máxima por cada ciclo del alternador. La intensidad eficaz es el valor intermedio que produce los mismos efectos energéticos que una corriente continua del mismo valor. Además es la que indican los amperímetros de C.A. Aplicando la ley de Ohm tendríamos que:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{R} \quad \text{siendo} \quad I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}$$

Actividad resuelta 6.2

¿Cuál es el valor eficaz de una tensión alterna si su valor máximo es de 311 V?

Solución: $V_{ef} = \dfrac{V_{máx}}{\sqrt{2}} = \dfrac{311}{\sqrt{2}} = 220$ V

Actividad resuelta 6.3

¿Cuál es el valor máximo de una tensión alterna de 125 V?

Solución: $V_{máx} = V_{ef} \cdot \sqrt{2} = 125 \cdot \sqrt{2} = 177$ V

Actividad resuelta 6.4

Conectamos una resistencia de 100 ohmios a una red de C.A. de 230 V. Determina el valor eficaz y máximo de la intensidad de la corriente.

Solución: Siempre que se nos indique el valor de la tensión o corriente de una C.A. se refiere al valor eficaz, que en nuestro ejemplo es de 230 V. De esta forma el valor eficaz de la corriente se calcula aplicando la ley de Ohm:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{R} = \frac{230}{100} = 2{,}3 \text{ A}$$

$$I_{máx} = I_{ef} \cdot \sqrt{2} = 2{,}3 \cdot \sqrt{2} = 3{,}25 \text{ A}$$

El conocimiento de los valores máximos que alcanza la tensión de una C.A. es muy importante, ya que es necesario seleccionar los aislantes adecuados para aparatos y conductores eléctricos que sean capaces de soportar dichos valores máximos.

6.2.5. Valor medio del ciclo completo

Si realizamos la media de todos los valores en un ciclo completo, dado que la mitad son positivos y la otra negativos, obtendremos un resultado de cero. Por esta razón, como un aparato de C.C. mide exclusivamente el valor me-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

dio, al realizar una medida con un voltímetro o amperímetro de C.C. en un sistema de C.A. obtendremos una medida igual a cero.

6.2.6. Ciclo o período

En el alternador elemental estudiado al comienzo de esta unidad didáctica, se podría decir que se produce un ciclo en cada vuelta que da la espira. El período es el tiempo que transcurre en un ciclo completo. Se representa por la letra T y se mide en segundos.

En el ejemplo de la Figura 6.6 se puede comprobar que el período es de 20 milésimas de segundo. Este tiempo es bastante pequeño y, en el caso de que lo produjese nuestro alternador elemental, significaría que tardaría solamente 20 ms en completar una vuelta.

¿Cuántas vueltas dará nuestro alternador elemental en un tiempo de 1 segundo?

Como por cada vuelta se invierten 0,02 segundos, en 1 segundo tendremos:

$$\frac{1}{0{,}02} = 50 \text{ vueltas}$$

En este caso se podría decir que el alternador gira a 50 vueltas por segundo y produce una C.A. senoidal de 50 ciclos por segundo.

6.2.7. Frecuencia

Es el número de ciclos que se produce en un segundo. Se representa por la letra f y se mide en hercios (Hz) o en ciclos/segundo.

De esta definición es fácil deducir que, en el caso del alternador elemental, la frecuencia es de 50 Hz y que coincide con las revoluciones por segundo de la espira. También se deduce que para calcular la frecuencia, conocido el período, emplearemos la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T}$$

Actividad resuelta 6.5

¿Cuál será el valor de la frecuencia de una C.A. senoidal si mediante un osciloscopio determinamos que su período es de 0,010 segundos?

Solución: $$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}010} = 100 \text{ Hz}$$

Actividad resuelta 6.6

Determina el período que le corresponde a la frecuencia de la red eléctrica americana, si su frecuencia es de 60 Hz.

Solución: $$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0{,}01666 \text{ s} = 16{,}66 \text{ ms}$$

Para medir la frecuencia se utiliza el frecuencímetro.

Actividad resuelta 6.7

En la Figura 6.7 se muestra el esquema de conexiones de un frecuencímetro y un voltímetro de C.A. conectados a la entrada de un cuadro de distribución. Las lecturas de estos aparatos de medida son de 40 Hz y 500 V, respectivamente.

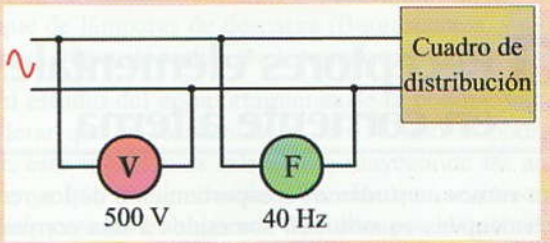


Figura 6.7.

Determina el período y el valor máximo de la tensión.

Solución: $$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40} = 0{,}025 \text{ s}$$

$$V_{máx} = V_{ef} \cdot \sqrt{2} = 500 \cdot \sqrt{2} = 707 \text{ V}$$

6.2.8. Relación entre la frecuencia y la velocidad angular

La frecuencia está relacionada directamente con la velocidad angular ω a la que gira el alternador. Para que un alternador, con un par de polos, produzca, por ejemplo, una frecuencia de 50 Hz, necesita girar a una velocidad de 50 revoluciones por segundo. La velocidad angular que le correspondería en este caso sería la siguiente:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{50 \cdot 2\pi}{1} = 100\ \pi \text{ rad/s}$$

Otra forma de verlo sería así: en una revolución se cubre un tiempo igual a un período ($t = T$) y un ángulo igual a 2π radianes ($\alpha = 2\pi$):

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} \quad \text{como} \quad f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2\pi f$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 6.8

¿Qué valor instantáneo alcanzará una tensión de 50 Hz y un valor máximo de 311 V en un tiempo de 0,003 s?

Solución: Primero calculamos la velocidad angular:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 100 \cdot \pi \text{ rad/s}$$

El valor instantáneo a los 0,003 s se calcula así:

$$v = V_{máx} \operatorname{sen} \omega t = 311 \cdot \operatorname{sen}(100 \cdot \pi \cdot 0{,}003 \text{ rad}) =$$
$$= 311 \cdot \operatorname{sen}(54^\circ) = 251{,}6 \text{ V}$$

Nota: *Se ha transformado el ángulo en radianes a grados para operar el seno.*

6.3 Receptores elementales en corriente alterna

Ahora vamos a estudiar el comportamiento de los receptores elementales cuando son sometidos a una corriente alterna. Dentro de la multitud de receptores que se pueden construir existen tres elementos claramente diferenciados. Nos referimos a las resistencias, las bobinas y los condensadores. Estos receptores se comportan de diferente manera según se les aplique corriente continua o alterna.

6.3.1. Circuito con resistencia pura

Los circuitos con resistencia aparecen prácticamente en todo tipo de receptores, ya que hay que tener en cuenta que los propios conductores con los que se diseñan los receptores siempre poseen algo de resistencia. Por supuesto, los receptores que utilizan básicamente la resistencia son los calefactores.

En corriente continua. Recordemos que cuando una corriente continua fluye por una resistencia, ésta se calienta. Para calcular el valor de la corriente aplicamos la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

I = Intensidad en amperios.

V = Tensión en voltios.

R = Resistencia en ohmios.

La potencia que aparece en la resistencia se transforma en energía calorífica y se calcula mediante las expresiones:

$$P = V \cdot I \qquad P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios.

En corriente alterna. Una resistencia pura se comporta de forma similar en corriente alterna y en continua. En este caso también se cumple la ley de Ohm, pero ahora se aplica con los valores eficaces de la corriente y la tensión, que son los que indicarían un amperímetro y un voltímetro, respectivamente (Figura 6.8).

$$I = \frac{V}{R}$$

I = Intensidad eficaz en amperios.

V = Tensión eficaz en voltios.

R = Resistencia en ohmios.

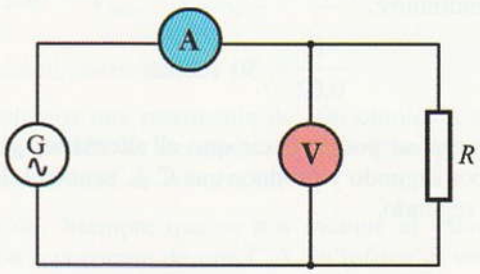


Figura 6.8.

De esta manera, se puede deducir que, para una tensión determinada aplicada a una resistencia, la intensidad eficaz que aparece en corriente alterna es del mismo valor que la intensidad de corriente continua que recorre el mismo circuito.

Es por eso que la potencia que se desarrolla en C.A. es igual que la que se desarrolla en C.C., hecho que se puede comprobar experimentalmente. Si conectamos un vatímetro para medir la potencia a la que trabaja una resistencia óhmica pura, podremos verificar que la lectura del vatímetro es la misma para C.C. que para C.A., siempre y cuando utilicemos los mismos valores de tensión e intensidad en C.C. que los eficaces de C.A.

$$P = V \cdot I \qquad P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios.

Dado que la tensión que aplicamos a la resistencia varía según la forma de una senoide, si aplicásemos la ley de Ohm a todos estos valores, obtendríamos una intensidad de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

corriente eléctrica que también es una senoide, tal como se muestra en la Figura 6.9.

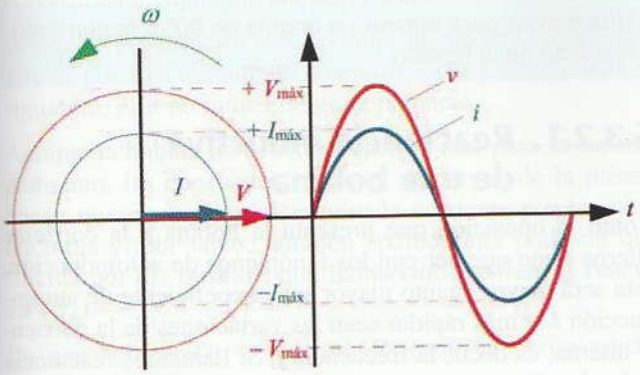


Figura 6.9. Representación de la tensión y la corriente en una resistencia.

Si observamos detenidamente la representación gráfica de la tensión e intensidad, podremos comprobar que, cuando el valor de la tensión V aumenta o disminuye, también lo hace el de la corriente I, alcanzando los valores máximos y nulos en el mismo instante. En este caso se puede decir que la corriente y la tensión están en fase.

En el gráfico de la izquierda de la Figura 6.9 se ha representado el diagrama vectorial de V y de I. Estas magnitudes aparecen dibujadas como dos vectores que giran a la velocidad ω en el sentido contrario a las agujas de un reloj; el valor instantáneo de las mismas es el que correspondería a la proyección de estos vectores en el eje Y. Para que la representación sea correcta es necesario dibujar estos vectores con una longitud que sea proporcional a los valores de la tensión e intensidad.

Actividad resuelta 6.9

Determina la corriente y la potencia activa que aparecerán en una resistencia pura de 50 ohmios, si la sometemos a una tensión alterna senoidal de 230 V. Dibuja el diagrama vectorial.

Solución: Mientras no nos indiquen ninguna otra referencia, la tensión a la que se refiere el enunciado de este problema es el valor eficaz. De esta forma, el valor eficaz de la intensidad de la corriente es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{230}{50} = 4{,}6 \text{ A}$$

La potencia activa se puede calcular así:

$$P = R \cdot I^2 = 50 \cdot 4{,}6^2 = 1.058 \text{ W}$$

El diagrama vectorial lo dibujamos a una determinada proporción de los valores $I = 4{,}6$ A y $V = 230$ V, tal como se muestra en la Figura 6.10.

Figura 6.10.

6.3.2. Circuito con bobina

Las bobinas están presentes en todos aquellos receptores en los que sea necesaria la producción de un campo magnético. Nos referimos a bobinas de choque, bobinas para filtros, electroimanes, contactores, motores, reactancias de arranque de lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.), transformadores, etc.

Para el estudio del comportamiento de la bobina, vamos a considerar que su resistencia es cero. Como se podrá entender, este supuesto es falso en la mayoría de las aplicaciones, ya que los conductores con los que se construyen habitualmente las bobinas son de cobre, por lo que siempre tienen una determinada resistencia.

En corriente continua. Si conectamos una bobina a una tensión continua, en ella aparece una corriente eléctrica que queda únicamente limitada por la resistencia que posean los conductores con los que haya sido fabricada. Según la ley de Ohm: $I = V/R$. Dado que esta resistencia suele ser pequeña, si aplicamos una tensión elevada a la bobina, aparece una fuerte corriente por ésta, desarrollándose una alta potencia que puede llegar a destruirla por el calor generado.

En corriente alterna. Si conectamos la misma bobina a una tensión alterna, se puede comprobar experimentalmente que la corriente que fluye ahora por la misma es más bien moderada. Si conectamos un vatímetro, podríamos comprobar cómo el consumo de potencia es prácticamente nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que la bobina desarrolla una cierta oposición a la corriente eléctrica de carácter diferente a la resistencia óhmica.

Todos estos fenómenos se deben al efecto de autoinducción de la bobina: «Cuando la bobina es recorrida por una corriente alterna, aparece una corriente variable y, por tanto, un campo magnético también variable» (Figura 6.11). Dado que las líneas de fuerza del flujo magnético, que ella misma genera, cortan a sus propios conductores, surge una f.e.m. de autoinducción que, según la ley de Lenz, se va a oponer a la causa que la produjo. Es decir, se opone, en todo momento, a los cambios de corriente.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

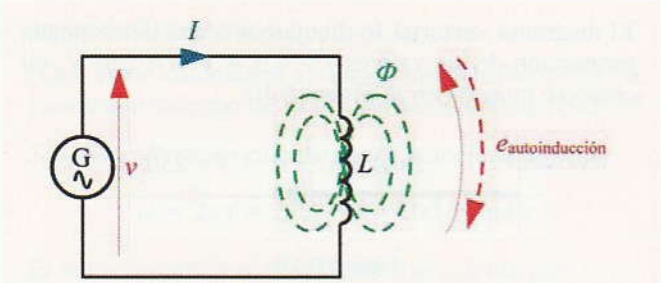


Figura 6.11. La f.e.m. de autoinducción de la bobina se opone a la corriente.

Cuando la corriente, siguiendo las variaciones de la función senoidal, tiende a crecer, el campo magnético también lo hace. Aparece entonces una f.e.m. que se opone a que la corriente se establezca, provocando un efecto de retraso en la corriente eléctrica respecto de la tensión (al conectar una bobina a una tensión alterna, la tensión aparece inmediatamente, mientras que la corriente tarda cierto tiempo en establecerse). En estas condiciones la bobina se está cargando de energía en forma de campo magnético creciente.

Cuando la corriente se ha establecido con su valor máximo por la bobina, la f.e.m. de autoinducción se hace cero. Pero cuando la corriente empieza a disminuir, también lo hace el campo, y entonces se genera una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que se opone a que la corriente desaparezca. Ahora la bobina descarga hacia el generador la energía que había acumulado en forma de campo magnético decreciente.

En realidad, una bobina pura (sin resistencia óhmica) devuelve toda la energía que ha utilizado para crear el campo magnético y, en consecuencia, la potencia media que consume es cero.

En la Figura 6.12 se ha representado a la corriente eléctrica con un retraso de 90° respecto de la tensión. Observa cómo, efectivamente, cuando la intensidad quiere crecer, la tensión es máxima y es en este momento cuando se carga la bobina.

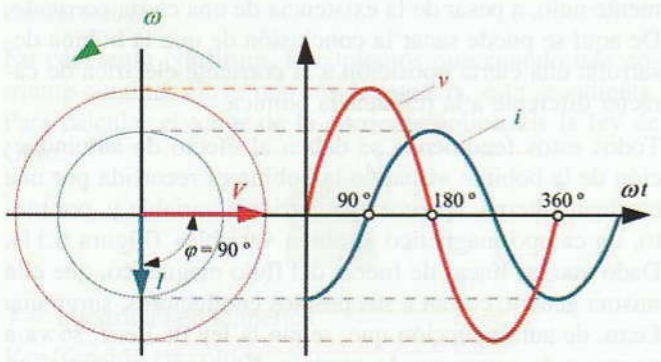


Figura 6.12. Diagrama vectorial de *V* e *I* en una bobina pura.

En este caso se dice que la intensidad está desfasada respecto a la tensión con un retraso de un cuarto de ciclo, es decir, ángulo φ de 90°.

Una bobina pura retrasa un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

6.3.2.1. Reactancia inductiva de una bobina

Como la oposición que presenta la bobina a la corriente alterna tiene que ver con los fenómenos de autoinducción, ésta será mayor cuanto mayor sea el coeficiente de autoinducción L y más rápidas sean las variaciones de la corriente alterna, es decir, la frecuencia f. Si llamamos reactancia inductiva X_L a la oposición que presenta la bobina a la corriente, tendremos que:

$$X_L = 2\pi f L$$

X_L = Reactancia inductiva en ohmios.
f = Frecuencia en hercios.
L = Coeficiente de autoinducción en henrios.

Para calcular el valor eficaz de la corriente en una bobina, aplicaremos la siguiente expresión, que es muy similar a la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{X_L}$$

6.3.2.2. Potencia en una bobina

Tal como indicábamos al principio de esta unidad didáctica, si se mide la potencia de una bobina pura, al aplicarle una C.A., se puede comprobar que el vatímetro indica una potencia igual a cero.

Al contrario de lo que ocurre en una resistencia, en una bobina pura no se produce ningún consumo de energía calorífica. La corriente que recorre la bobina sirve únicamente para generar el campo magnético.

En realidad lo que ocurre es que, al intentar crecer la corriente por la bobina, también lo hace el campo magnético, produciéndose un consumo de energía eléctrica. En este caso la energía fluye del generador de C.A. hacia la bobina y es cuando decimos que ésta se está cargando de energía electromagnética. Una vez alcanzada la corriente máxima y el flujo máximo, éstos tienden a disminuir siguiendo la trayectoria senoidal, desarrollándose una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que genera una energía eléctrica que, ahora, fluye desde la bobina hacia el generador. En este caso, la bobina devuelve la energía al generador. De

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

esta manera tenemos que la bobina no consume realmente la energía, simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo para generar su campo electromagnético, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo.

Dado que el vatímetro mide el valor medio de la potencia y ésta es positiva durante un cuarto de ciclo y negativa en el siguiente, éste no indica ninguna potencia.

Aunque la bobina no consuma energía real para su funcionamiento, las constantes cargas y descargas de la misma hacen que circule una determinada corriente por los conductores y, por tanto, también aparece una potencia que fluctúa por los mismos, que llamaremos: **potencia reactiva (Q_L)**.

En una bobina: $Q_L = X_L I^2$ (VAR) (volti-amperios-reactivos).

Actividad resuelta 6.10

Se conecta una bobina con un coeficiente de autoinducción de 0,2 henrios a una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 6.13. Si el voltímetro indica una tensión de 125 V, averigua las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva de la bobina. Dibuja el diagrama vectorial.

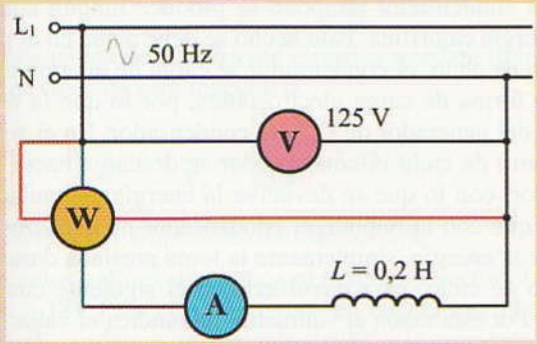


Figura 6.13.

Solución: Primero determinamos la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}2 = 62{,}8\ \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{125}{62{,}8} = 2\ \text{A}$$

La lectura del amperímetro es de 2 A, que se corresponde con el valor eficaz de la corriente.

Con estos valores ya podemos dibujar el diagrama vectorial (Figura 6.14). Para ello tendremos en cuenta que la bobina produce un retraso de 90º a la corriente respecto de la tensión.

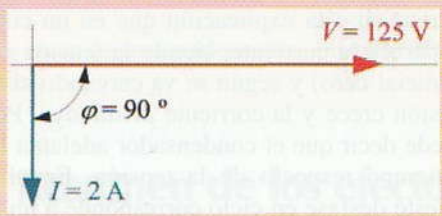


Figura 6.14.

La potencia reactiva se calcula con la expresión:

$$Q_L = X_L I^2 = 62{,}8 \cdot 2^2 = 251\ \text{VAR}$$

Como se trata de una bobina pura, el vatímetro indica 0 vatios.

6.3.3. Circuito con condensador

En corriente continua. Cuando aplicamos C.C. a un condensador, éste se carga de energía eléctrica, haciendo fluir corriente eléctrica por el circuito sólo durante dicha carga. De esta forma, se puede decir que un condensador no permite el paso de la corriente continua.

En corriente alterna. Si conectamos un condensador a una tensión alterna (Figura 6.15), se puede comprobar experimentalmente que ahora sí fluye corriente de una forma constante. Si conectásemos un vatímetro, al igual que ocurre con el circuito con bobina, podríamos comprobar cómo el consumo de potencia es nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que el condensador, lo mismo que la bobina, no consume potencia.

Figura 6.15. **El condensador se carga y descarga al aplicarle C.A.**

Estudiemos con detenimiento los fenómenos que se producen. Cuando aplicamos la tensión al condensador, como éste está totalmente descargado, aparece en él una fuerte corriente de carga. Según se carga el condensador, la ten-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

sión que aparece en éste va aumentando, mientras disminuye la corriente. Cuando se completa la carga la corriente es cero y la tensión alcanza su valor máximo. Se habrá podido observar en esta explicación que en un condensador primero aparece la corriente, siendo la tensión cero (nivel de carga inicial cero) y según se va cargando el condensador la tensión crece y la corriente disminuye. Por esta razón se puede decir que el condensador adelanta la corriente en el tiempo respecto de la tensión. En el diagrama vectorial, este desfase en ciclo corresponde a un ángulo de 90° (Figura 6.16).

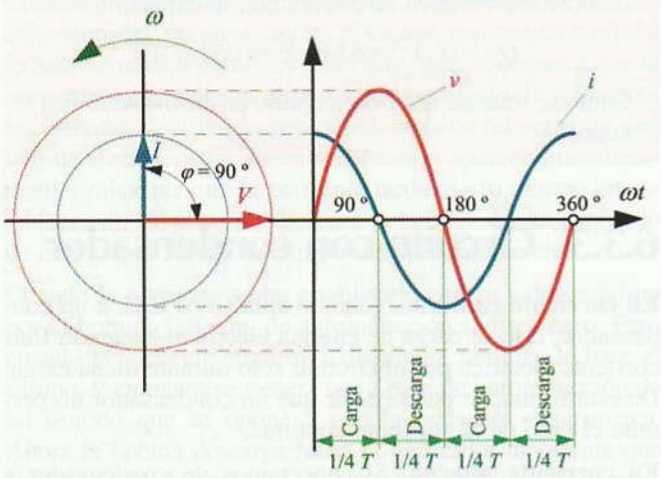


Figura 6.16. Diagrama vectorial de *V* e *I* en un condensador.

Cuando la tensión aplicada al condensador comienza su descenso, éste descarga la energía acumulada en el 1/4 de ciclo anterior, con lo que aparece una corriente de descarga por el circuito.

Un condensador puro adelanta un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

6.3.3.1. Reactancia capacitiva de un condensador

Un condensador, en C.A., hace que fluya constantemente una corriente eléctrica por el circuito debido a las constantes cargas y descargas de aquél. Es importante hacer notar que esta corriente nunca llega a atravesar el dieléctrico del condensador, pero sí pasa por los conductores que lo alimentan.

Como el establecimiento de la corriente eléctrica en un condensador cuando se le aplica una C.A. tiene que ver con los fenómenos de carga y descarga de éste, dicha corriente será mayor cuanto mayor sea la capacidad del condensador y más rápidas sean dichas cargas y descargas, es decir, la frecuencia *f*. Si llamamos reactancia capacitiva X_C a la oposición que presenta la bobina a la corriente, tendremos que:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

X_C = Reactancia capacitiva en ohmios.
f = Frecuencia en hercios.
C = Capacidad del condensador en faradios.

Para calcular el valor eficaz de la corriente en un condensador, aplicaremos la expresión similar a la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{X_C}$$

6.3.3.2. Potencia en un condensador

Al igual que ocurre con la bobina, si se mide con un vatímetro la potencia de un condensador al conectarlo a una C.A., se puede comprobar que éste indica una potencia igual a cero.

En un condensador tampoco se produce ningún consumo de energía calorífica. Este hecho se debe a que en el primer cuarto de ciclo, el condensador se carga de energía eléctrica en forma de carga electrostática, por lo que la energía fluye del generador de C.A. al condensador. En el siguiente cuarto de ciclo el condensador se descarga hacia el generador, con lo que se devuelve la energía acumulada. Al igual que con la bobina, el condensador no consume realmente la energía, simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo. Por esta razón el vatímetro, que indica el valor medio de la potencia instantánea, indica una potencia igual a cero.

La corriente que fluye hacia el condensador sirve sólo para producir las cargas y descargas constantes de éste. Además, aquí también aparece una potencia reactiva Q_C producida por la energía que se intercambia entre el condensador y el generador.

En un condensador: $Q_C = X_C I^2$ (VAR) (volti-amperios-reactivos).

Se puede comprobar que cuando la bobina descarga su energía eléctrica acumulada en forma de campo electromagnético, se produce el ciclo de carga del condensador. En conclusión se puede decir que la potencia reactiva del condensador es negativa respecto a la bobina y que, por tanto, sus efectos se compensan. Este aspecto habrá que tenerlo en cuenta cuando conectemos en un mismo circuito bobinas con condensadores.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 6.11

Se conecta un condensador de 75 μF a una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 6.17. Si el voltímetro indica una tensión de 230 V, averigua las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva del condensador. Dibuja el diagrama vectorial.

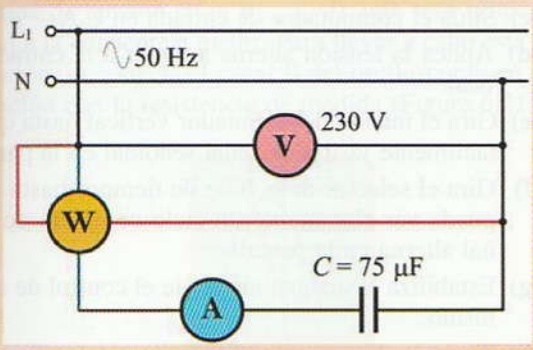


Figura 6.17.

Solución: Primero determinamos la reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75} = 42{,}4\ \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{230}{42{,}4} = 5{,}42\ \text{A}$$

La lectura del amperímetro es de 5,42 A.

Con estos valores dibujamos el diagrama vectorial (Figura 6.18). Para ello tendremos en cuenta que el condensador produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión.

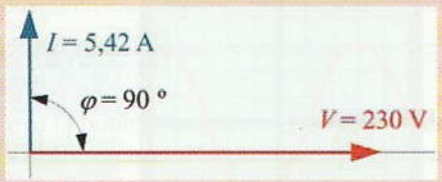


Figura 6.18.

La potencia reactiva se calcula con la expresión:

$$Q_C = X_C I^2 = 42{,}4 \cdot 5{,}42^2 = 1.246{,}7\ \text{VAR}$$

Como se trata de un condensador, el vatímetro indica cero vatios.

6.3.4. Resumen de los efectos producidos por los receptores elementales

En la Tabla 6.1 se muestra un resumen de los efectos que producen los receptores elementales en C.A.

Tabla 6.1.

Receptor	Diagrama vectorial	Resistencia reactancia	Desfase entre V e I	Potencia
R	I V	R	En fase	Activa $P = RI^2$
L	V $\varphi = 90°$ I	$X_L = 2\pi fL$	I se retrasa 90° respecto a V	Reactiva $Q_L = X_L I^2$
C	I $\varphi = 90°$ V	$X_C = 1/2\pi fC$	I se adelanta 90° respecto a V	Reactiva $Q_C = X_C I^2$

Actividad propuesta 6.1

Se dispone de una bobina con una autoinducción de 100 mH a la que se le aplica una tensión senoidal de valor instantáneo igual a: $u = 398 \operatorname{sen} 120\pi t$. Calcula:

a) Valor eficaz de la tensión.
b) Frecuencia y período.
c) Reactancia inductiva de la bobina.
d) Intensidad de corriente eficaz.
e) Expresión de la corriente instantánea.
f) Potencia reactiva de la bobina.

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

6.1 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica y, como en otras ocasiones, contrasta y amplía la información obtenida.

6.2 Medida de magnitudes asociadas a una tensión senoidal. Consigue un generador de funciones (instrumento muy utilizado en electrónica que sirve para producir tensiones variables a diferentes frecuencias) y, a modo de ejercicio práctico, comprueba con un osciloscopio (aparato que muestra en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica; es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo) los valores de las magnitudes asociadas a las tensiones senoidales de diferentes frecuencias (véase la Figura 6.19).

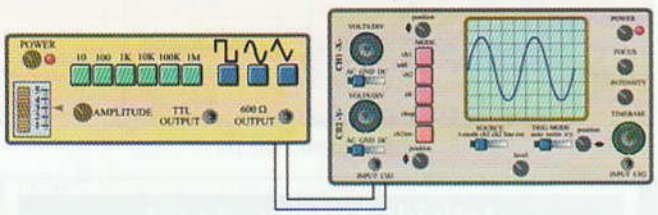


Figura 6.19. Esquema de conexiones de un osciloscopio que mide las magnitudes asociadas a tensiones senoidales proporcionadas por un generador de funciones.

Para ampliar los conocimientos sobre el manejo del osciloscopio y del generador de funciones conviene que antes realices un estudio más completo de éstos, como el que se propone en la Unidad didáctica 9.

Consigue la información técnica sobre el osciloscopio que vayas a utilizar para realizar este ejercicio práctico e identifica todos los controles del mismo.

Pasaremos ahora a realizar el ejercicio propuesto al principio de este apartado. Para hacerlo correctamente sigue atentamente las siguientes recomendaciones:

a) Pon en marcha el osciloscopio siguiendo las instrucciones que aparecen en el manual de funcionamiento.

b) Sitúa el mando del amplificador vertical en su valor máximo. De esta forma evitaremos que la tensión que deseamos medir sea superior a la que está preparado el osciloscopio.

c) Sitúa el conmutador de entrada en C.A.

d) Aplica la tensión alterna a medir a la entrada vertical.

e) Gira el mando del atenuador vertical hasta que sea fácilmente visible la señal senoidal en la pantalla.

f) Gira el selector de la base de tiempos hasta que se pueda ver claramente un ciclo completo de la señal alterna en la pantalla.

g) Estabiliza la imagen mediante el control de sincronismo.

h) Toma las lecturas de la pantalla y determina el valor máximo y el período. Con estos datos se puede calcular el valor eficaz y la frecuencia.

Así, por ejemplo, en el caso de que la imagen que aparece en la pantalla fuese la de la Figura 6.20 y los grados de desviación fuesen: atenuador vertical, 4 V/div; base de tiempos: 1 ms/div. El valor máximo y eficaz de la tensión, así como el periodo y la frecuencia la calcularíamos así:

$$V_{máx} = 3 \text{ div} \cdot 4 \text{ V/div} = 12 \text{ V}$$

$$T = 8 \text{ div} \cdot 1 \text{ ms/div} = 0{,}008 \text{ s}$$

$$V_{eficaz} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}} = 8{,}5 \text{ V}$$

$$f = 1/T = \cdots = 125 \text{ Hz}$$

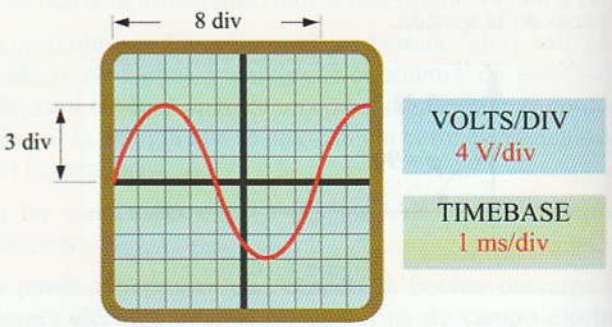


Figura 6.20.

6.3 Medida del ángulo de desfase en un circuito de C.A. Con este sencillo ejercicio práctico comprobaremos los ángulos de desfase que provocan las bobinas puras y los condensadores.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Consigue una bobina con un coeficiente de autoinducción elevado y de baja resistencia óhmica. Conectaremos el canal A del osciloscopio en derivación con la bobina, de esta forma, conseguimos que aparezca por este canal la tensión senoidal aplicada.

Como el osciloscopio sólo mide tensiones, conectamos una resistencia de medida, de bajo valor óhmico, en serie con la bobina, con el fin de medir en ella la caída de tensión ($V = R_{medida} \cdot I$), que será proporcional a la corriente a medir. Para llevar a cabo esta operación, se conecta el canal B del osciloscopio en derivación con la resistencia de medida (Figura 6.21).

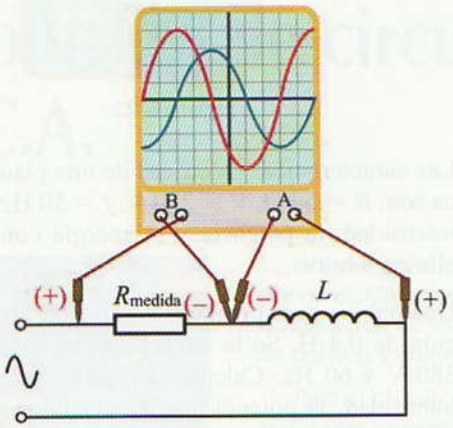


Figura 6.21. Medida de *V* e *I* con un osciloscopio.

Nota: *Las puntas de prueba de ambos canales poseen una conexión interior en común en el terminal (−). Para evitar que se cortocircuiten las señales, es conveniente conectar al mismo punto del circuito este terminal, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 6.21. El resultado de este condicionante es que la tensión y la corriente quedan en oposición, es decir, desfasados 180°. Para poder visualizar correctamente la señal en la pantalla del osciloscopio hay que invertir la señal del canal B mediante el control de inversión de la polaridad.*

¿Se consiguen exactamente 90° de desfase entre *V* e *I*?

¿Por qué razón el ángulo de desfase provocado es algo menor de 90°?

Sustituye la bobina por un condensador y, teniendo en cuenta las mismas consideraciones, visualiza en el osciloscopio la tensión y la corriente por éste, determinando el ángulo de desfase entre *V* e *I*.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para su adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

AUTOEVALUACIÓN

6.1 ¿A qué se debe que un alternador produzca una tensión que cambia constantemente de valor y de sentido?

A ❑ A que los electrones son empujados a moverse según gira el alternador.

B ❑ A que los conductores en su giro cortan el campo magnético con diferentes ángulos.

6.2 ¿Qué indica un voltímetro de C.C. al ser conectado a una red de C.A.?

A ❑ El valor eficaz.

B ❑ El valor máximo.

C ❑ Cero.

6.3 De todos los valores que compone una C.A. senoidal, ¿cuál es el que se utiliza siempre para cálculos y medidas?

A ❑ El valor eficaz.

B ❑ El valor medio.

C ❑ El valor máximo.

6.4 ¿Por qué es interesante conocer el valor máximo de la tensión en un sistema de C.A.?

A ❑ Es el que se utiliza comúnmente para realizar cálculos y medidas.

B ❑ Es el que hay que tener en cuenta para la elección de los aislantes.

C ❑ De él depende el valor de la frecuencia.

6.5 De los componentes que a continuación se exponen, ¿cuál de ellos produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión?

A ❑ Una bobina.

B ❑ Un condensador.

C ❑ Una resistencia.

6.6 Las bobinas y los condensadores no consumen realmente energía eléctrica. ¿Cómo se denomina a la potencia eléctrica que intercambian con el generador?

A ❑ Potencia activa.

B ❑ Potencia aparente.

C ❑ Potencia reactiva.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

6.7 Cuando se conecta una resistencia a una red de C.A. se produce un desfase entre la tensión y la corriente de:

A ❑ 0°.

B ❑ 90°.

C ❑ 45°.

6.8 Con un voltímetro de C.A. se mide una tensión de 100 V, ¿cuál es el valor máximo de la tensión?

6.9 Averigua la frecuencia de un C.A. si su período es de 5 ms.

6.10 Determina la tensión máxima que deberá soportar el dieléctrico de un condensador, si aplicamos una tensión entre sus placas de 380 V.

6.11 Al medir con un osciloscopio una tensión alterna, obtenemos la señal que se indica en la Figura 6.22. Si están el atenuador vertical en 10 V/div y la base de tiempos en 5 ms/div, determina el valor máximo, el valor eficaz, el período, la frecuencia y el valor instantáneo a los 5 ms.

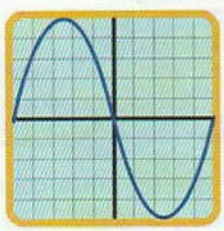


Figura 6.22.

6.12 El valor máximo de una tensión senoidal es de 311 V, para una frecuencia de 50 Hz. Halla los valores instantáneos de la tensión para los tiempos: 1, 3, 5, 6, 10, 11, 13 y 20 ms y sitúa los mismos en un gráfico de la onda senoidal.

6.13 Si una tensión senoidal posee un valor de 90 V a los 30° del ciclo, encuentra su valor eficaz.

6.14 Al conectar un osciloscopio a una fuente de tensión senoidal aparece en su pantalla la imagen de la Figura 6.23. Averigua la lectura de los siguientes aparatos de medida conectados a la misma fuente: a) un voltímetro de C.A., b) un voltímetro de C.C., c) un frecuencímetro.

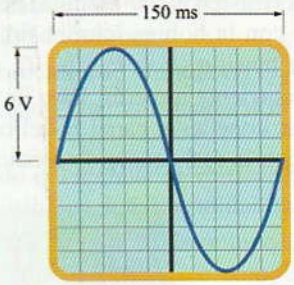


Figura 6.23.

6.15 Las características eléctricas de una plancha eléctrica son: $R = 50\ \Omega$, $V = 220$ V, $f = 50$ Hz. Calcula la intensidad, la potencia y la energía consumida por ella en 8 horas.

6.16 Una bobina pura posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 H. Se la conecta a una red de C.A. de 380 V y 60 Hz. Calcula la reactancia inductiva, la intensidad, la potencia reactiva y la energía consumida en 8 horas.

6.17 Se conecta un condensador de 200 μF a un generador de funciones senoidales de 100 Hz y 50 V. Determina la intensidad de la corriente y la potencia reactiva.

AMPLIACIÓN

6.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 6*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

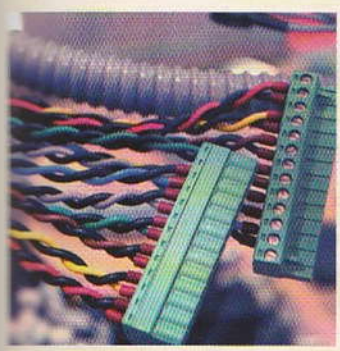
6.2 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

7

Resolución de circuitos en C.A.



Al igual que en C.C. conectábamos resistencias en serie, en C.A. es fácil encontrar circuitos que consistan en bobinas, resistencias y condensadores conectados en serie o en paralelo. Para la resolución de estos circuitos siempre habrá que tener en cuenta los desfases que producen las bobinas y condensadores.

Para el cálculo de circuitos mixtos utilizaremos el cálculo vectorial con números complejos, que, como ya veremos más adelante, consiste en tratar las impedancias, tensiones y corrientes como vectores representados por un número complejo. Por lo demás, la resolución de estos circuitos es similar a los ya estudiados en C.C.

Contenido

7.1. **Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias**
7.2. **Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores**
7.3. **Circuito en serie R-L-C**
7.4. **Importancia práctica del factor de potencia (cos φ)**
7.5. **Circuitos oscilantes**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Resolver circuitos en serie de C.A.
- Distinguir y calcular los tres tipos de potencia de un circuito de C.A., así como encontrar y seleccionar adecuadamente los sistemas para la corrección del factor de potencia.
- Interpretar los procesos que se dan en un circuito resonante.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

7.1 Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias

En la práctica es difícil encontrar circuitos que sean exclusivamente inductivos, ya que para la fabricación de las bobinas se utilizan hilos metálicos conductores (normalmente de cobre) con una cierta resistencia. Este tipo de circuitos es muy común, como es el caso de los motores, circuitos de arranque en las lámparas fluorescentes, contactores, electroimanes, etc.

En la Figura 7.1 se ha representado el circuito equivalente de una bobina real, que en este caso está formado por una resistencia de valor óhmico R conectada en serie con una bobina pura de reactancia X_L.

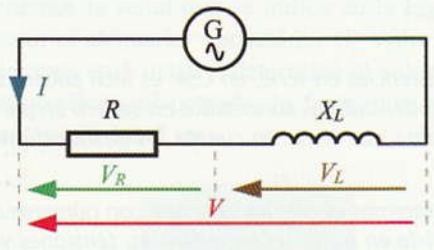


Figura 7.1. **Circuito serie R-L.**

Si a este circuito le conectamos una serie de aparatos de medida, tal como se muestra en la Figura 7.2 y aplicamos una tensión alterna al conjunto, se obtienen las siguientes conclusiones:

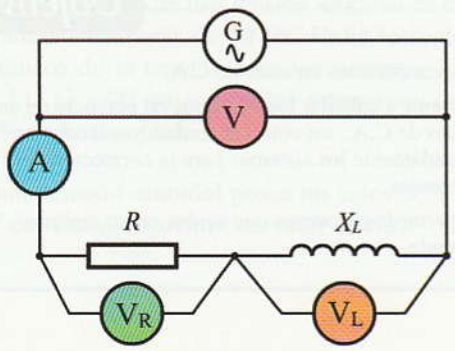


Figura 7.2.

Dado que se trata de un circuito en serie, aparece una única corriente I por el circuito que queda reflejada en el amperímetro A. El valor de esta corriente depende de la combinación de los valores de R y X_L, de tal forma que, cuanto mayores sean éstos, menor es la corriente.

La combinación de los efectos limitadores de la corriente producidos por la resistencia y la bobina se la conoce por el nombre de impedancia y se representa por la letra Z.

Para determinar el valor de la corriente en el circuito ahora aplicamos la ley de Ohm de esta manera:

$$I = \frac{V}{Z}$$

Los voltímetros V_R y V_L nos indican, respectivamente las tensiones que aparecen en la resistencia y la bobina. Se puede comprobar experimentalmente que en ambos casos se cumple la ley de Ohm para la corriente alterna, de lo que se deduce que:

$$V_R = RI \qquad V_L = X_L I$$

Dado que se trata de un circuito en serie, cabría pensar que la lectura del voltímetro V, que indica la tensión total aplicada, tendría que ser la suma de las lecturas de los voltímetros $V_R + V_L$. Al hacer la experiencia, comprobamos que esta relación no se cumple. ¿Cuál es la explicación?

En realidad sí se cumple que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma de las tensiones que aparecen en la resistencia y la bobina, pero de forma vectorial:

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L$$

Hay que pensar que la bobina produce un desfase en las magnitudes eléctricas que hace que estas tensiones no varíen al mismo tiempo, por lo que para sumarlas habrá que conocer su situación en el diagrama vectorial.

Para que el diagrama vectorial sea más fácil de interpretar, vamos a tomar como referencia la intensidad, ya que ésta es común a los dos receptores. Para ello situamos el vector I con un ángulo de cero grados, tal como se muestra en la Figura 7.3.

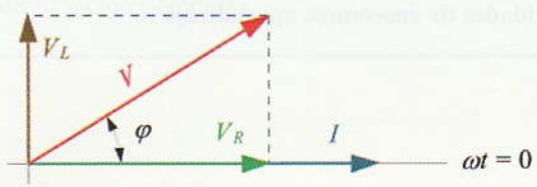


Figura 7.3. **Diagrama vectorial de un circuito R-L.**

Dado que la resistencia óhmica no provoca ningún tipo de desfase, dibujamos en el diagrama vectorial la caída de tensión V_R en fase con la intensidad de corriente.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Una bobina provoca un retraso de 90° de la corriente respecto de la tensión. Como hemos dibujado la corriente en el ángulo cero, habrá que situar el vector de la tensión en la bobina V_L adelantado respecto de la corriente un ángulo de 90°.

Una vez situados correctamente en el diagrama los vectores de tensión, la tensión del conjunto V se obtiene haciendo la suma vectorial de V_R y V_L. Si se observa el resultado obtenido podemos comprobar que la tensión V queda adelantada un ángulo φ respecto de la corriente.

Dicho de otra manera: En un circuito R-L la corriente queda retrasada un ángulo φ respecto de la tensión, que ya no es de 90° como en el caso de la bobina pura. El valor de este ángulo dependerá de los valores de la resistencia respecto de la bobina. Así, por ejemplo, si en un circuito es mucho mayor la resistencia que la reactancia de la bobina este ángulo será pequeño. Al contrario, si predomina la reactancia inductiva sobre la resistencia el ángulo alcanzará valores próximos a los 90°.

7.1.1. Triángulo de tensiones

Observando el diagrama vectorial de la Figura 7.3, detectamos que los vectores de las tensiones forman un triángulo rectángulo, donde V es la hipotenusa y V_R y V_L los catetos, tal como se muestra en la Figura 7.4. Si aplicamos el teorema de Pitágoras a este triángulo podemos obtener la siguiente relación:

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

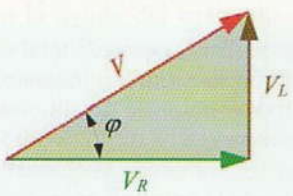


Figura 7.4. **Triángulo de tensiones.**

7.1.2. Triángulo de impedancias

Vamos a expresar en el triángulo de tensiones, las relaciones de la ley de Ohm, tal como se muestra en la Figura 7.5(a). Si ahora dividimos cada uno de los lados de este triángulo entre la intensidad I, común a todo ellos, obtendremos el triángulo de impedancias que se muestra en la Figura 7.5(b).

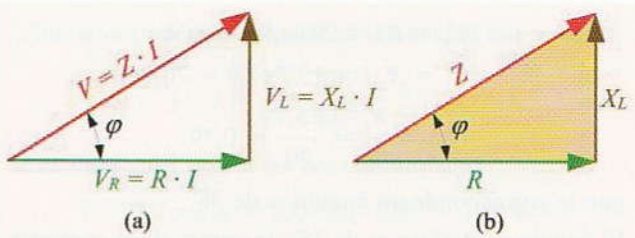


Figura 7.5. **(a) Triángulo de tensiones. (b) Triángulo de impedancias.**

Con el triángulo de impedancias podemos obtener el valor de la impedancia Z:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Para determinar el ángulo φ de desfase entre V e I se puede utilizar la relación trigonométrica de la tangente:

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{X_L}{R}$$

Una vez obtenida la tangente, mediante unas tablas trigonométricas o una calculadora científica, se determina el ángulo que le corresponde.

Actividad resuelta 7.1

El circuito equivalente de la bobina de un contactor es el que se representa en la Figura 7.6. El circuito consta de una resistencia de 20 ohmios y de una bobina pura con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios. Se trata de averiguar los valores de Z, I, φ, V_R y V_L si aplicamos una tensión senoidal de 125 voltios y 50 hercios. Dibuja el diagrama vectorial de V e I.

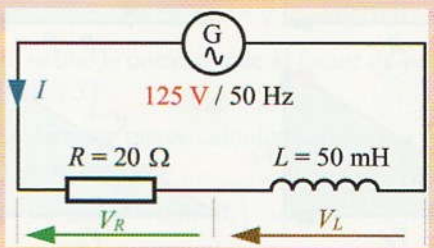


Figura 7.6.

Solución: $X_L = 2\,\pi f L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}05 = 15{,}7\ \Omega$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 15{,}7^2} = 25{,}4\ \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{125}{25{,}4} = 4{,}9\ \text{A}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

$$V_R = RI = 20 \cdot 4{,}9 = 98 \text{ V}$$

$$V_L = X_L I = 15{,}7 \cdot 4{,}9 = 76{,}9 \text{ V}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{15{,}7}{20} = 0{,}79$$

que le corresponde un ángulo φ de 38°.

El ángulo de desfase es de 38° de retraso de la corriente respecto de la tensión, tal como se ha representado en el diagrama vectorial correspondiente en la Figura 7.7.

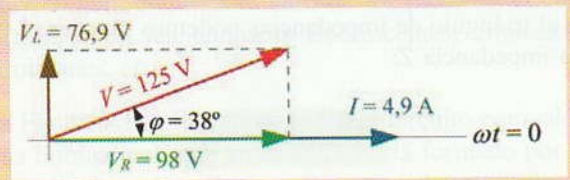


Figura 7.7.

7.1.3. Potencia en un circuito R-L

En un circuito con resistencia y bobina se puede observar que existe un consumo de energía eléctrica que se transforma en calor a causa de la resistencia *R*. Por otro lado, en la bobina se producen constantes cargas y descargas de energía en forma de campo electromagnético. Esto da lugar a que en el mismo circuito coexistan diferentes tipos de potencias.

Al multiplicar por la intensidad el triángulo de tensiones del diagrama vectorial y el triángulo de impedancias obtenemos el triángulo de potencias de la Figura 7.8.

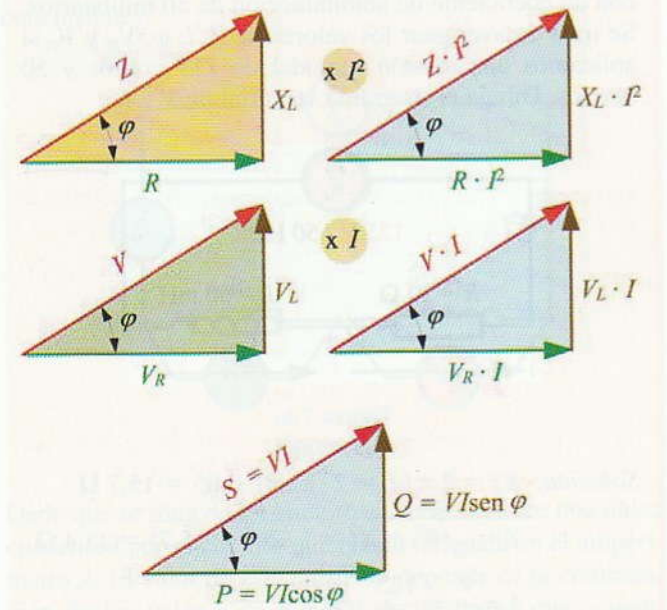


Figura 7.8. **Triángulo de potencias.**

Potencia activa: Este tipo de potencia es el que se transforma en calor en la resistencia. Se puede decir que es la única potencia que realmente se consume en el circuito y, por tanto, es la que debe aportar el generador al circuito.

Esta potencia es la que miden los vatímetros y en una resistencia se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P = RI^2 \quad \text{o} \quad P = V_R I$$

Su unidad de medida es el vatio (W). Según el triángulo de potencias, para calcular la potencia activa de cualquier circuito podemos utilizar la siguiente expresión:

$$P = VI\cos\varphi$$

Potencia reactiva: Es la potencia con la que se carga y descarga constantemente la bobina. Realmente es una potencia que no se consume, únicamente se intercambia entre el generador y la bobina, haciendo fluir una corriente extra por los conductores de alimentación.

En una bobina la potencia reactiva se calcula mediante la expresión:

$$Q_L = X_L I^2 \quad \text{o} \quad Q_L = V_R I$$

Su unidad de medida es el volti-amperio-reactivo (VAR). Según el triángulo de potencias, para calcular la potencia reactiva de cualquier circuito utilizamos la expresión:

$$Q = VI\,\text{sen}\,\varphi$$

Potencia aparente: Es la potencia total que transportan los conductores que alimentan al circuito. Dado que en un circuito R-L existe potencia activa y reactiva, por los conductores que alimentan a dicho circuito se transportan ambas potencias. Si sumamos vectorialmente estas potencias, obtendremos la potencia aparente (Figura 7.9).

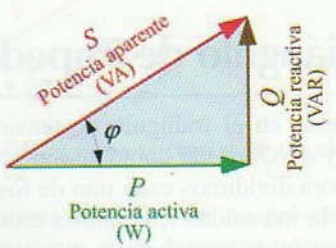


Figura 7.9. **Triángulo de potencias.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Se suele representar por la letra S y su unidad de medida el volti-amperio (VA). Para calcular la potencia aparente de cualquier circuito utilizamos la expresión:

$$S = VI$$

Del triángulo de potencias se deduce que la potencia aparente también es igual a:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Factor de potencia (FP): Este valor nos indica la relación que existe entre la potencia activa y la aparente:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

Si observamos el triángulo de potencias, comprobamos que el factor de potencia coincide con el valor del coseno de φ.

De alguna manera, el factor de potencia o coseno de φ (ángulo de desfase entre V e I) nos indica la cantidad de potencia activa que existe en un circuito respecto a la potencia total aparente.

Actividad resuelta 7.2

Se conectan en serie una bobina de reactancia inductiva igual a 20 Ω con una resistencia de 40 Ω a una tensión de 100 V. Averigua la potencia activa, reactiva y aparente del circuito, así como el factor de potencia. Dibuja el triángulo de potencias y valora el significado del FP obtenido.

Solución: Con la ayuda del triángulo de impedancias (véase la Figura 7.10) averiguamos la impedancia del circuito, el cos φ y el ángulo φ de desfase entre V e I.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 20^2} = 44{,}7\ \Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{44{,}7} = 0{,}89$$

Le corresponde un ángulo $\varphi = 27^\circ$.

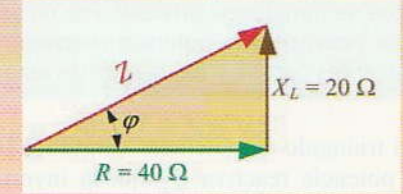


Figura 7.10.

Ahora ya podemos calcular la intensidad del circuito:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{100}{44{,}7} = 2{,}2\ \text{A}$$

Las diferentes potencias del circuito son:

$$P = VI \cos \varphi = 100 \cdot 2{,}2 \cdot 0{,}89 = 196\ \text{W}$$

$$Q = VI \operatorname{sen} \varphi = 100 \cdot 2{,}2 \cdot \operatorname{sen} 27^\circ = 100\ \text{VAR}$$

$$S = VI = 100 \cdot 2{,}2 = 220\ \text{VA}$$

En la Figura 7.11 se ha dibujado el triángulo de potencias correspondiente. El factor de potencia resultante es 0,89, valor que está más próximo a la unidad que al cero. Esto nos indica que en el circuito predomina la potencia activa frente a la reactiva. Otra interpretación podría ser la siguiente: de cada 100 unidades de potencia aparente, 89 son de potencia activa.

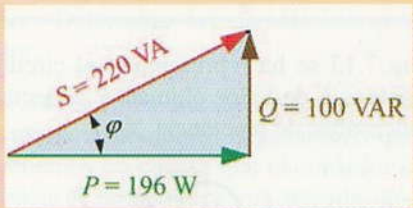


Figura 7.11.

Actividad resuelta 7.3

Las características de una lámpara fluorescente son las siguientes: $P = 40$ W, $V = 230$ V, $\cos \varphi = 0{,}6$. Determina la intensidad, la potencia reactiva y aparente y el circuito equivalente.

Solución: Para el cálculo de la intensidad nos valemos de la fórmula general de potencia activa:

$$P = VI \cos \varphi \ \Rightarrow\ I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{40}{230 \cdot 0{,}6} = 0{,}3\ \text{A}$$

El ángulo φ que le corresponde al factor de potencia de 0,6 es igual a 53°.

Con estos datos se puede calcular la potencia reactiva y aparente de la lámpara.

$$Q = VI \operatorname{sen} \varphi = 230 \cdot 0{,}3 \cdot \operatorname{sen} 53^\circ = 55\ \text{VAR}$$

$$S = VI = 230 \cdot 0{,}3 = 69\ \text{VA}$$

El circuito equivalente de una lámpara fluorescente se puede dibujar como una reactancia inductiva y una resistencia en serie (Figura 7.12). Para determinar los valores de R y X_L, utilizamos las fórmulas ya conocidas:

$$P = RI^2 \ \Rightarrow\ R = \frac{P}{I^2} = \frac{40}{0{,}3^2} = 444\ \Omega$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

$$Q_L = X_L I^2 \Rightarrow X_L = \frac{Q_L}{I^2} = \frac{55}{0{,}3^2} = 611\ \Omega$$

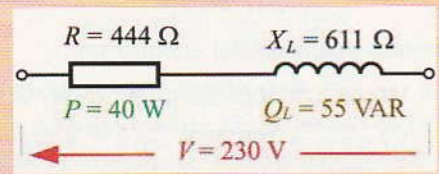


Figura 7.12.

7.2 Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores

En la Figura 7.13 se ha representado el circuito formado por una resistencia de valor óhmico R conectada en serie con un condensador de reactancia X_C.

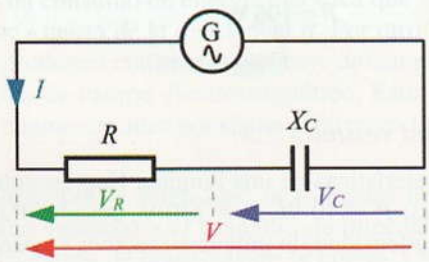


Figura 7.13. **Circuito serie R-C.**

Al igual que ocurría con el circuito R-L, aquí aparece una sola corriente eléctrica I que queda limitada por la impedancia del circuito Z.

$$I = \frac{V}{Z}$$

En la resistencia aparece una caída de tensión V_R y en el condensador V_C.

$$V_R = RI \qquad V_C = X_C I$$

Aquí también se cumple que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma vectorial de las caídas de tensión que se dan en la resistencia y el condensador:

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_C$$

Para dibujar el diagrama vectorial (véase la Figura 7.14) de estas magnitudes eléctricas tenemos en cuenta que la caída de tensión VR queda en fase con la intensidad. Por otro lado, el condensador provoca un adelanto de 90° de la corriente respecto de la tensión. Como hemos dibujado la corriente en el ángulo cero, habrá que situar el vector de la tensión V_C del condensador retrasado respecto de la corriente en un ángulo de 90°.

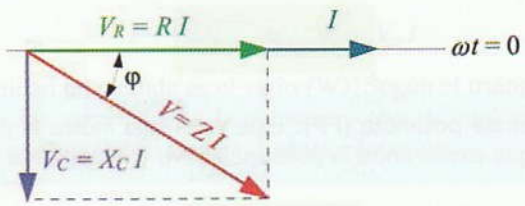


Figura 7.14. **Diagrama vectorial de un circuito R-C.**

En el diagrama vectorial, observamos que la corriente I queda adelantada un ángulo φ respecto a la tensión.

De este diagrama vectorial se deduce el triángulo de impedancia de la Figura 7.15. Con él ya podemos determinar el valor de la impedancia y el del ángulo de desfase por cualquiera de las relaciones trigonométricas.

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_C}{R}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

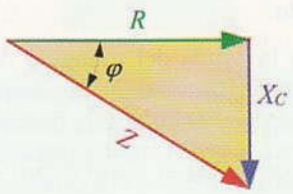


Figura 7.15. **Triángulo de impedancias.**

En cuanto a las potencias que se dan en el circuito, es necesario indicar que en la resistencia se produce potencia activa que se transforma en calor. Por otro lado, en el condensador aparece una potencia reactiva provocada por las constantes cargas y descargas de éste.

Al dibujar el triángulo de potencias (Figura 7.16) observamos que la potencia reactiva Q_C queda invertida, lo que nos indica que ésta posee un valor negativo respecto de la potencia reactiva que produce la bobina.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

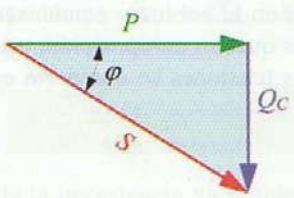


Figura 7.16. **Triángulo de potencias.**

Actividad resuelta 7.4

En el circuito de la Figura 7.17 se muestra un circuito serie R-C. Averigua la lectura de los aparatos de medida, así como la intensidad de la corriente, potencia reactiva, potencia aparente y el factor de potencia. Dibuja el diagrama vectorial correspondiente.

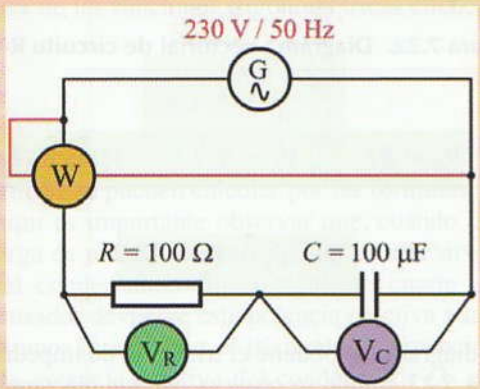


Figura 7.17.

Solución: $X_C = \dfrac{1}{2\pi f C} = \dfrac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 31{,}8\ \Omega$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = 100^2 + 31{,}8^2 = 105\ \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{230}{105} = 2{,}2\ \text{A}$$

$$V_R = RI = 100 \cdot 2{,}2 = 220\ \text{V}$$

$$V_C = X_C I = 31{,}8 \cdot 2{,}2 = 70\ \text{V}$$

$$\text{tg}\ \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{31{,}8}{100} = 0{,}32$$

Le corresponde un ángulo $\varphi = 17{,}7°$.

$$P = VI \cos \varphi = 230 \cdot 2{,}2 \cdot \cos 17{,}7° = 482\ \text{W}$$

$$Q = VI \operatorname{sen} \varphi = 230 \cdot 2{,}2 \cdot \operatorname{sen} 17{,}7° = 154\ \text{VAR}$$

$$S = VI = 230 \cdot 2{,}2 = 506\ \text{VA}$$

$$\text{FP} = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{482}{506} = 0{,}95$$

El ángulo de desfase es de 17,7° de adelanto de la corriente respecto de la tensión, tal como se muestra en diagrama vectorial de la Figura 7.18.

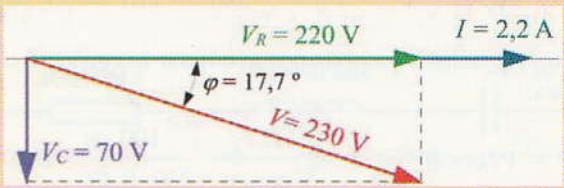


Figura 7.18.

Actividad resuelta 7.5

Para evitar que un pequeño soldador para circuitos impresos de 110 V/100 W se funda al conectarlo a una red de C.A. de 230 V/50 Hz, se le conecta en serie un condensador. Determina las características de dicho condensador.

Solución: Para hacernos una idea de cómo resolver este problema, primero dibujamos el circuito (Figura 7.19). Para ello tenemos en cuenta que el soldador consta de una resistencia R sometida a una tensión de 110 V y que desarrolla una potencia de 100 W.

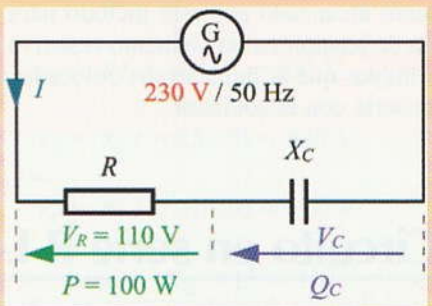


Figura 7.19.

Con la ayuda del triángulo de tensiones (Figura 7.20) podemos averiguar el factor de potencia y la tensión V_C que aparece en el condensador.

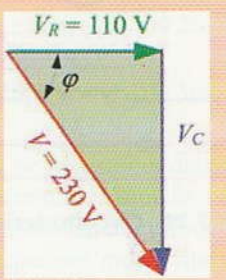


Figura 7.20.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

$$\cos\varphi = \frac{V_R}{V} = \frac{110}{230} = 0{,}49$$

$$V_C = \sqrt{V^2 - V_R^2} = \sqrt{230^2 - 110^2} = 202 \text{ V}$$

Con estos datos ya podemos averiguar la corriente eléctrica:

$$P = VI\cos\varphi \Rightarrow I = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{100}{230 \cdot 0{,}49} = 0{,}89 \text{ A}$$

Aplicamos la ley de Ohm al condensador para determinar su reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{V_C}{I} = \frac{202}{0{,}89} = 227\ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Rightarrow$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 227} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 14\ \mu\text{F}$$

Las características del condensador son de 14 µF/202 V.

Como el condensador no consume potencia activa, el rendimiento alcanzado por este método para provocar una caída de tensión en un elemento resistivo es infinitamente mayor que si hubiésemos colocado una resistencia en serie con el soldador.

7.3 Circuito en serie R-L-C

En la Figura 7.21 hemos conectado en serie una resistencia R, una bobina con una reactancia inductiva X_L y un condensador con una reactancia capacitiva X_C.

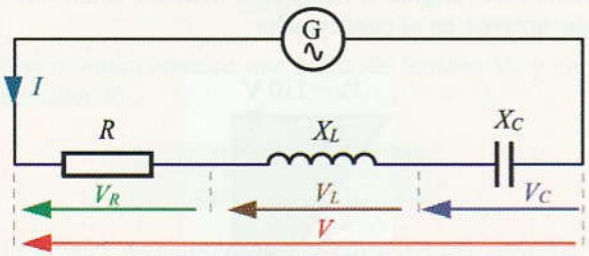


Figura 7.21. Circuito serie R-L-C.

En la Figura 7.22 se ha dibujado el diagrama vectorial correspondiente a este circuito. Al situar en el diagrama las caídas de tensión en la bobina y condensador (V_L y V_C) se observa que éstas quedan en oposición, por lo que la suma vectorial de estas tensiones se convierte en una resta aritmética.

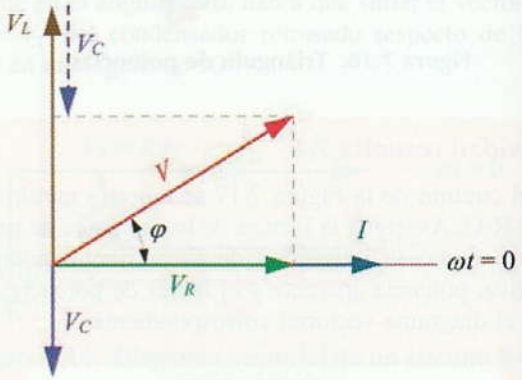


Figura 7.22. Diagrama vectorial de circuito R-L-C.

$$V_R = RI \qquad V_L = X_L I \qquad V_C = X_C I$$

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_C$$

De este diagrama se obtiene el triángulo de impedancias de la Figura 7.23, donde se observa que las reactancias de la bobina y el condensador quedan también en oposición.

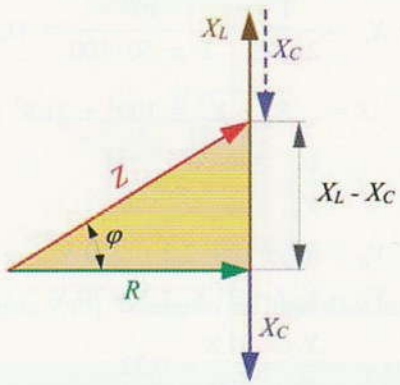


Figura 7.23. Triángulo de impedancias.

Para construir el triángulo de impedancias de la Figura 7.23 se ha supuesto que la reactancia inductiva X_L es más grande que la reactancia X_C del condensador. Al obtener la impedancia Z del circuito, observamos que los efectos que pudiera provocar la reactancia del condensador quedan compensados por la reactancia de la bobina. El resultado es que el circuito se comporta como si únicamente tuviese

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

una bobina de reactancia igual a $(X_L - X_C)$. Del triángulo de impedancias se deduce que:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Una vez obtenida la impedancia ya se puede calcular la intensidad de la corriente eléctrica:

$$I = \frac{V}{Z}$$

Al predominar, en este caso, la reactancia inductiva sobre la capacitiva, se produce un ángulo de retraso φ de la corriente respecto de la tensión. Para calcular este ángulo nos valemos del triángulo de impedancias al que aplicamos cualquiera de las funciones trigonométricas conocidas.

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Las potencias se pueden calcular por las fórmulas ya conocidas. Aquí es importante observar que, cuando la bobina se descarga de potencia reactiva, parte de ella sirve para la carga del condensador. En el siguiente cuarto de ciclo, el condensador devuelve esta potencia reactiva a la bobina. Si tuviésemos que dibujar el triángulo de potencias, situaríamos la potencia reactiva del condensador Q_C en oposición con la de la bobina Q_L, de tal forma que sus efectos queden compensados, tal como se muestra en la Figura 7.24.

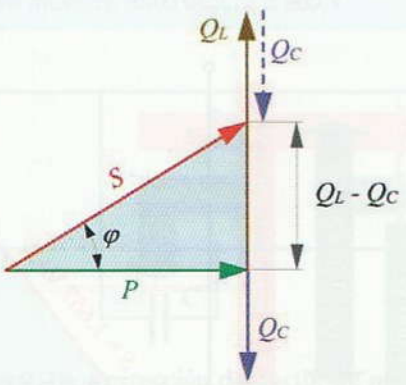


Figura 7.24. Triángulo de potencias.

Actividad resuelta 7.6

Averigua los valores de Z, I, V_R, V_L, V_C, P, Q, S y el factor de potencia del circuito serie R-L-C de la Figura 7.25. Dibuja el diagrama vectorial.

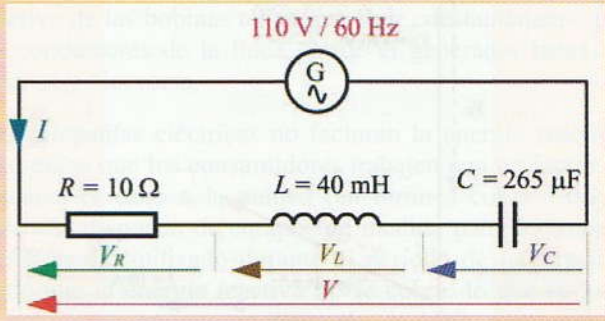


Figura 7.25.

Solución: $X_L = 2\pi f L = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0{,}04 = 15\ \Omega$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 265} = 10\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} =$$

$$= \sqrt{10^2 + (15 - 10)^2} = 11\ \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{110}{11} = 10\ \text{A}$$

$$V_R = RI = 10 \cdot 10 = 100\ \text{V}$$

$$V_L = X_L I = 15 \cdot 10 = 150\ \text{V}$$

$$V_C = X_C I = 10 \cdot 10 = 100\ \text{V}$$

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{15 - 10}{10} = 0{,}5$$

le corresponde un ángulo $\varphi = 26{,}6^\circ$.

$$P = VI\cos\varphi = 110 \cdot 10 \cdot \cos 26{,}6^\circ = 984\ \text{W}$$

$$Q = VI\,\text{sen}\,\varphi = 110 \cdot 10 \cdot \text{sen}\,26{,}6^\circ = 493\ \text{VAR}$$

$$S = V \cdot I = 110 \cdot 10 = 1.100\ \text{VA}$$

En la Figura 7.26, se muestra el diagrama vectorial correspondiente al circuito. Aquí se observa que la corriente queda retrasada un ángulo de 26,6° respecto de la tensión, hecho que nos indica que el circuito es predominantemente inductivo.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

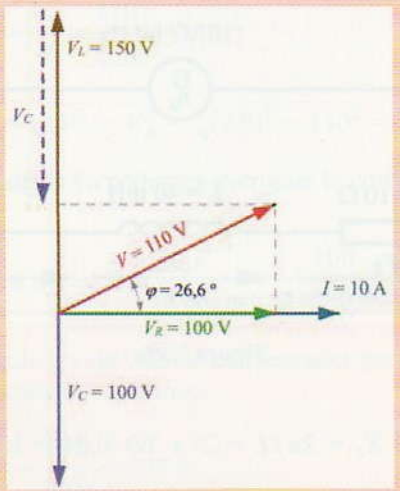
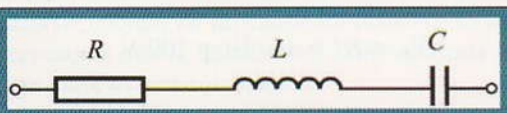


Figura 7.26.

Actividad propuesta 7.1

Resuelve los ejercicios planteados en la Tabla 7.1 para diferentes circuitos en serie R-L-C.

Tabla 7.1.



Ejercicio	1º	2º	3º	4º	5º	6º
R (Ω)	50	10	50	—	?	?
L (H)	0,1	—	0,2	0,5	?	?
C (μF)	—	10	200	100	—	—
V (V)	100	400	230	200	100	230
I (A)	?	?	?	?	10	3
f (Hz)	60	50	50	50	50	50
F.P.	?	?	?	?	0,5	?
P (W)	?	?	?	?	?	500
Q (VAR)	?	?	?	?	?	?
S (VA)	?	?	?	?	?	?

*** La solución a esta actividad propuesta se encuentra en www.paraninfo.es.*

7.4 Importancia práctica del factor de potencia (cos φ)

Pongamos como ejemplo un motor monofásico de 1.000 W a 230 V con un cos φ = 0,6. Estos datos nos indican que el motor desarrolla una potencia mecánica equivalente a los 1.000 W de potencia activa suministrados por la red eléctrica. Por otro lado, el factor de potencia está bastante por debajo de la unidad, lo que nos muestra la presencia de una potencia reactiva elevada causada por el efecto de la autoinducción de los bobinados. Hay que pensar que la potencia reactiva no se transforma en trabajo útil en el motor, simplemente sirve para generar el campo electromagnético, para luego ser devuelta al generador. Este trasiego de energía reactiva del generador al motor y viceversa, hace que la compañía suministradora de energía eléctrica tenga que proporcionar una potencia aparente por la red eléctrica muy superior a la que realmente se consume. En consecuencia, se produce un aumento de corriente por los conductores de la línea que repercute directamente en los costes de las instalaciones eléctricas propiedad de las compañías.

En nuestro ejemplo (Figura 7.27):

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{1.000}{0,6} = 1.667 \text{ VA}$$

$$Q = S \operatorname{sen}\varphi = 1.667 \cdot 0,8 = 1.334 \text{ VAR}$$

$$I = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{1.000}{230 \cdot 0,6} = 7,25 \text{ A}$$

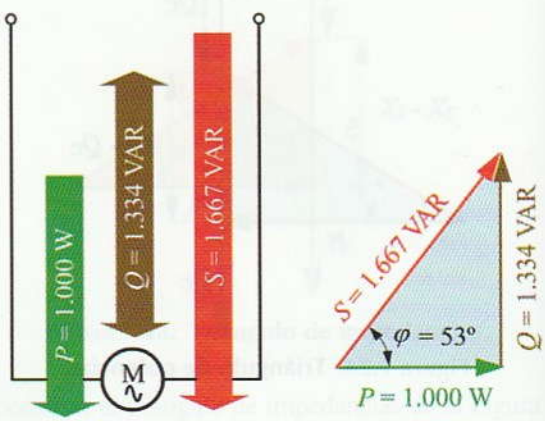


Figura 7.27.

De los datos obtenidos se deduce que el motor produce un consumo de 1.000 W, pero necesita de un suministro de 1.667 VA por la línea para funcionar.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Si por algún método consiguiésemos mejorar el factor de potencia hasta, por ejemplo, 0,95 obtendríamos los siguientes valores (Figura 7.28):

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{1.000}{0,95} = 1.053 \text{ VA}$$

$$Q = S \operatorname{sen}\varphi = 1.053 \cdot 0,31 = 326 \text{ VAR}$$

$$I = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{1.000}{230 \cdot 0,95} = 4,6 \text{ A}$$

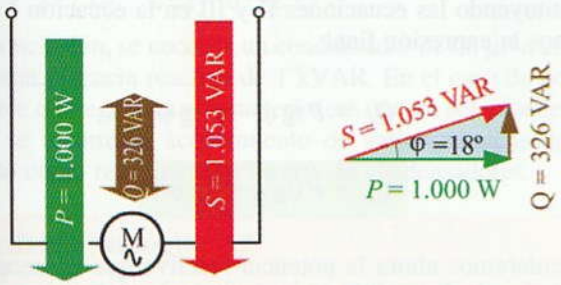


Figura 7.28.

De lo que se deduce que al acercar el factor de potencia a la unidad obtenemos una reducción de corriente considerable, así como de la potencia aparente y reactiva.

Para contrarrestar el consumo excesivo de potencia reactiva de carácter inductivo y así reducir también la potencia aparente y la corriente por la línea se instalan condensadores conectados en paralelo con los receptores, tal como se muestra en la Figura 7.29.

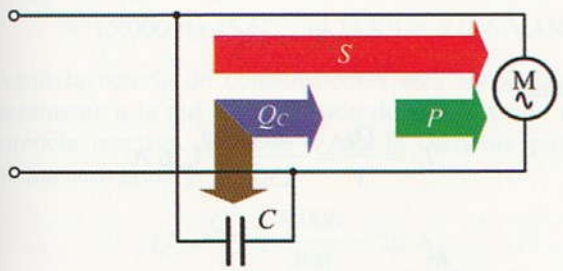


Figura 7.29. Corrección del factor de potencia mediante condensadores.

Los condensadores compensan parte de la potencia reactiva de las bobinas. Hay que pensar que en el instante en que las bobinas descargan su energía reactiva, los condensadores se cargan con la misma. En el siguiente cuarto de ciclo, los condensadores devuelven esta energía acumulada a las bobinas para que puedan desarrollar los campos electromagnéticos. De esta forma se evita que parte de la energía reactiva de las bobinas tenga que fluir constantemente por los conductores de la línea, desde el generador hasta las mismas y viceversa.

Las compañías eléctricas no facturan la energía reactiva, pero exige que los consumidores trabajen con un factor de potencia cercano a la unidad (en torno a $\cos\varphi = 0,95$). Para ello disponen de equipos de medida para determinar el *FP* medio utilizado durante el período de facturación. Dado que la energía reactiva no se cobra, lo que se hace es aplicar un recargo en el precio de kWh consumido a los clientes que trabajen con un *FP* por debajo del recomendado.

Así, por ejemplo, en las instalaciones industriales se aplica la bonificación o recargo que se muestra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Bonificaciones y recargos por el factor de potencia.

	Bonificación (%)								0	2,2	4
Cos φ	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1
	47	35,2	26,2	19,2	13,7	9,2	5,6	2,5	Recargo (%)		

Además en las tarifas eléctricas se indica que cuando un abonado tenga en su instalación un factor de potencia que sea inferior a 0,55 en tres o más mediciones, la empresa suministradora deberá comunicarlo al Organismo competente de la Administración Pública, quien podrá establecer al usuario un plazo para la mejora de su factor de potencia, y si no se cumpliera el plazo establecido, resolver la aplicación de recargos pudiendo llegar a ordenar la suspensión del suministro en tanto no se mejore la instalación en la medida precisa.

En el siguiente enlace de Internet del Ministerio de Industria y Energía podras encontrar información actualizada sobre las tarifas eléctricas vigentes:

http://www.mityc.es/Electricidad/Seccion/Tarifas/

En resumen, con la mejora del *FP* se consigue reducir la potencia aparente de la red sin modificar la potencia activa, lo que trae consigo una reducción de la intensidad de corriente por la línea de suministro de energía. Ello aporta considerables ventajas, como son: reducción de la sección de los conductores en la línea, reducción de la caída de tensión, y reducción de las pérdidas de potencia en los conductores.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

7.4.1. Corrección del factor de potencia mediante condensadores

Las instalaciones industriales suelen utilizar normalmente receptores de tipo inductivo, como por ejemplo, motores, lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.), transformadores, electroimanes, etc. Para compensar la energía reactiva producida por estos elementos utilizaremos un condensador (o varios) acoplados en batería, de tal forma que el coseno de φ final obtenido sea próximo a la unidad.

Para el cálculo de la potencia reactiva de estos condensadores o de su capacidad vamos a utilizar el siguiente ejemplo:

Se trata de mejorar el factor de potencia de un motor monofásico de 1.000 W/230 V con un factor de potencia de 0,6 hasta conseguir un factor de potencia de 0,95. Para ello conectamos un condensador de potencia reactiva Q_C y capacidad C en paralelo con el motor, tal como se muestra en la Figura 7.30.

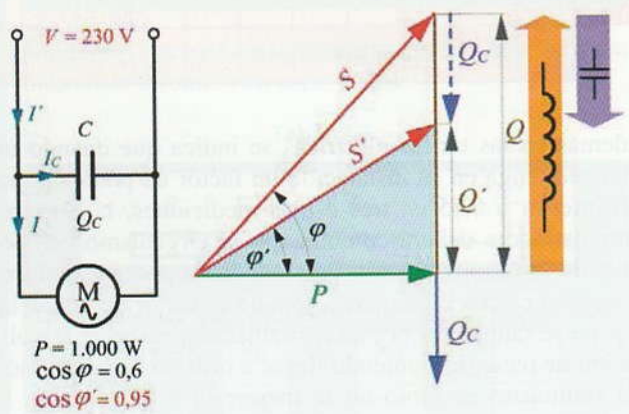


Figura 7.30. Triángulo de potencias en la mejora del factor de potencia.

La solución de este problema comienza con la búsqueda de la potencia reactiva Q_C, que deberá poseer el condensador para pasar de un factor de potencia de 0,6 a 0,95. Para ello nos vamos a valer del triángulo de potencias que hemos dibujado en la Figura 7.30.

Llamamos φ al ángulo que corresponde al factor de potencia inicial de 0,6 y φ' al ángulo del factor de potencia que deseamos obtener de 0,95. Q es la potencia reactiva inicial del motor, al que le tenemos que restar la potencia reactiva Q_C del condensador.

Una vez mejorado el factor de potencia obtenemos una potencia reactiva reducida:

$$Q' = Q - Q_C$$

de donde

$$Q_C = Q - Q' \qquad (I)$$

En los dos triángulos de potencia que se obtienen se cumple que:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \quad \text{de donde} \quad Q = P \operatorname{tg}\varphi \qquad (II)$$

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{Q'}{P} \quad \text{de donde} \quad Q' = P \operatorname{tg}\varphi' \qquad (III)$$

Sustituyendo las ecuaciones II y III en la ecuación I obtenemos la expresión final:

$$Q_C = P \operatorname{tg}\varphi - P \operatorname{tg}\varphi'$$

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi')$$

Calcularemos ahora la potencia reactiva que es necesario que tenga la batería de condensadores para corregir el *FP* de nuestro ejemplo:

El ángulo φ que le corresponde al cos 0,6 es 53°.

El ángulo φ' que le corresponde al cos 0,95 es 18°.

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi') = 1.000(\operatorname{tg} 53^\circ - \operatorname{tg} 18^\circ) = 1.002 \text{ VAR}$$

Para determinar la capacidad del condensador y la corriente eléctrica que lo alimenta, tenemos en cuenta que el condensador está acoplado directamente a la red a una tensión de 230 V y con una potencia reactiva de 1.002 VAR, tal como se muestra en la Figura 7.31. En este caso se cumple que la potencia reactiva del condensador es igual a:

$$Q_C = V I_C$$

de donde

$$I_C = \frac{Q_C}{V} = \frac{1.002}{230} = 4{,}36 \text{ A}$$

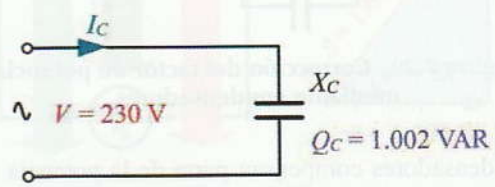


Figura 7.31.

Una vez averiguada la corriente que fluye hacia el condensador, si aplicamos la ley de Ohm para C.A. entre sus ex-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

tremos, podremos averiguar la reactancia capacitiva del mismo:

$$I_C = \frac{V}{X_C}$$

de donde

$$X_C = \frac{V}{I_C} = \frac{230}{4{,}36} = 52{,}75\ \Omega$$

La capacidad correspondiente al condensador para una frecuencia de 50 Hz es igual a:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 52{,}75} = 60 \cdot 10^{-6}\,\text{F} = 60\ \mu\text{F}$$

En conclusión, se necesita un condensador de 60 µF a 230 V con una potencia reactiva de 1 kVAR. En el caso de no ser posible conseguir estas características con un solo condensador, se recurre al acoplamiento de varios condensadores, dando como resultado una batería de condensadores.

Actividad resuelta 7.7

En una instalación industrial se mide un factor de potencia de 0,7. Dimensiona la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia hasta 0,9. Los datos de dicha instalación son los siguientes: potencia instalada 15 kW, frecuencia 50 Hz, tensión entre fases 400 V. Calcula también la corriente eléctrica por la línea antes y después de mejorar el factor de potencia.

Solución: Primero determinamos la potencia reactiva de la batería de condensadores para corregir el factor de potencia de 0,7 a 0,9:

El ángulo φ que le corresponde al cos 0,7 es 45,6°.

El ángulo φ' que le corresponde al cos 0,9 es 25,8°.

$$Q_C = P\,(\text{tg}\,\varphi - \text{tg}\,\varphi') =$$
$$= 15.000\ (\text{tg}\,45{,}6^\circ - \text{tg}\,25{,}8^\circ) = 8.066\ \text{VAR}$$

Como la batería de condensadores está acoplada directamente a la red a una tensión de 400 V y con una potencia reactiva de 8.066 VAR, la corriente por la misma será igual a:

$$I_C = \frac{Q_C}{V} = \frac{8.006}{400} = 20\ \text{A}$$

El conocimiento del valor de esta corriente es importante para dimensionar los conductores que alimentan a la batería de condensadores, así como para seleccionar las protecciones y dispositivos de control.

La reactancia capacitiva del condensador será entonces:

$$X_C = \frac{V}{I_C} = \frac{400}{20} = 20\ \Omega$$

La capacidad correspondiente al condensador para una frecuencia de 50 Hz es igual a:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20} = 159 \cdot 10^{-6}\,\text{F} = 159\ \mu\text{F}$$

La característica de la batería de condensadores es:

159 µF/400 V/8 kVAR

La corriente antes de mejorar el factor de potencia es:

$$I_{\cos\varphi(0,7)} = \frac{P}{V \cos\varphi} = \frac{15.000}{400 \cdot 0{,}7} = 53{,}6\ \text{A}$$

La corriente después de mejorar el factor de potencia es:

$$I_{\cos\varphi(0,9)} = \frac{P}{V \cos\varphi'} = \frac{15.000}{400 \cdot 0{,}9} = 41{,}7\ \text{A}$$

7.4.2. Tipos de compensación de la energía reactiva

La compensación de energía reactiva se lleva siempre a cabo mediante la conexión de condensadores en paralelo con la carga a compensar. En una instalación eléctrica con muchas cargas de carácter inductivo se puede llevar esta compensación de dos formas diferentes:

a) Compensación individual: Se conecta un condensador en paralelo con cada carga inductiva a compensar (Figura 7.32).

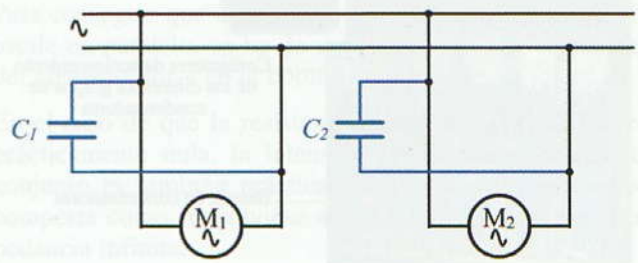


Figura 7.32. Compensación individual de potencia reactiva.

b) Compensación central: Se conecta una gran batería de condensadores en paralelo con la línea general para compensar la potencia reactiva de todo el conjunto de la instalación eléctrica (Figura 7.33). Como la potencia reactiva a compensar de la instalación depende de las cargas que estén conectadas en cada momento, se hace necesario la

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

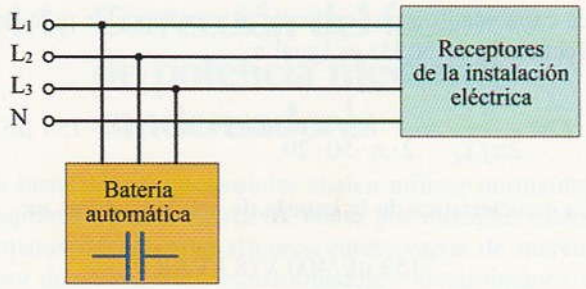


Figura 7.33. Compensación central de potencia reactiva mediante batería automática trifásica de condensadores.

utilización de baterías automáticas de condensadores que sean capaces de conectar y desconectar escalonadamente grupos de condensadores. Al dispositivo que es capaz de medir en todo momento el *FP* de la instalación y conecta automáticamente los condensadores necesarios, se le conoce por el nombre de regulador de potencia reactiva.

La compensación individual resulta muy costosa y se utiliza fundamentalmente para lámparas de descarga (se les incorpora el condensador directamente en el equipo de arranque y se las conoce como lámparas de *AF* (alto factor). En instalaciones trifásicas industriales con muchos receptores resulta mucho más ventajoso la compensación central con baterías automáticas de condensadores como la que se muestra en la Figura 7.34.

Figura 7.34. Batería automática de condensadores.

7.5 Circuitos oscilantes

Un circuito oscilante se forma cuando se interconectan bobinas y condensadores, de tal forma que se intercambien entre ellos energía eléctrica.

Si cargamos un condensador, tal como se indica en el esquema de la Figura 7.35 y posteriormente lo conectamos en paralelo con una bobina que posea la misma reactancia inductiva que la capacitiva del condensador ($X_L = X_C$), al conectar un osciloscopio, podremos observar que aparecen oscilaciones que se amortiguan al poco tiempo, tal como se muestra en la Figura 7.36.

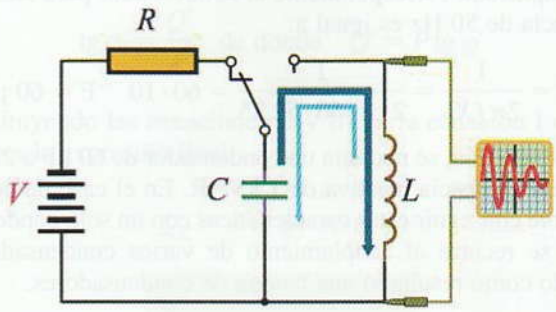


Figura 7.35. Comprobación experimental de un circuito oscilante.

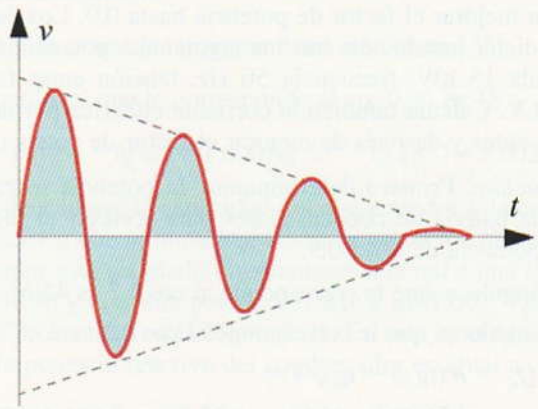


Figura 7.36. Oscilación amortiguada.

Este fenómeno se debe a que aparecen sucesivos ciclos de carga y descarga entre la bobina y el condensador. Estos ciclos repetidos de carga y descarga se van amortiguando por la presencia de la resistencia óhmica del circuito (conductores, bobina, etc.), que hace que la energía se vaya transformando en calor en cada uno de los ciclos.

7.5.1. Resonancia

El intercambio constante de energía entre una bobina y un condensador en un circuito oscilante se produce a una determinada frecuencia, conocida con el nombre de frecuencia de resonancia.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Se alcanza la resonancia cuando el valor de la reactancia inductiva es igual al de la reactancia capacitiva:

$$X_L = X_C$$

O lo que es lo mismo:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

de donde:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f_r = Frecuencia de resonancia (Hz).

L = Inductancia (H).

C = Capacidad (F).

Para evitar que las oscilaciones no desaparezcan, es necesario alimentar el circuito con una tensión alterna que posea la misma frecuencia que el circuito resonante.

Existen dos posibilidades de conseguir un circuito resonante: en serie o paralelo.

7.5.2. Resonancia en serie

Para conseguir que un circuito, como el de la Figura 7.37, se ponga en resonancia, se debe cumplir que la reactancia de la bobina sea igual a la del condensador.

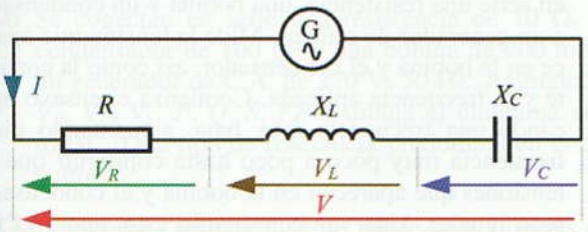


Figura 7.37. Circuito resonante en serie.

Cuando un circuito en serie entra en resonancia, la corriente se hace muy elevada, ya que al anularse las reactancias el único elemento que limita la corriente es la resistencia del circuito. Además se cumple que las caídas de tensión en la bobina y el condensador son iguales.

Actividad resuelta 7.8

El circuito serie de la Figura 7.37 está formado por una resistencia de 5 Ω, una bobina de 0,5 H y un condensador de 25 μF. Averigua cuál será la frecuencia de la tensión que habrá que aplicar para que el circuito entre en resonancia. Si el valor de la tensión aplicada es de 50 V, calcula el valor de la corriente y de las caídas de tensión en la bobina y el condensador para la frecuencia de resonancia.

Solución: La frecuencia de resonancia se calcula con la expresión ya conocida:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot\sqrt{0{,}5\cdot 25\cdot 10^{-6}}} = 45 \text{ Hz}$$

Dado que las reactancias se anulan, el único valor que limita la corriente es la resistencia:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R} = \frac{50}{5} = 10 \text{ A}$$

Al ser iguales la reactancia inductiva y la capacitiva, las caídas de tensión también lo son:

$$V_C = V_L = X_L I = 2\pi f L I = 2\cdot\pi\cdot 45\cdot 0{,}5\cdot 10 = 1.414 \text{ V}$$

El circuito oscilante en serie posee varias aplicaciones prácticas. Por ejemplo, se puede usar para eliminar una determinada frecuencia (la frecuencia de resonancia) en una señal que esté compuesta por multitud de frecuencias. Para ello lo que se hace es poner un circuito oscilante en paralelo con la señal, de tal forma que cortocircuita aquella señal que posea la frecuencia de resonancia.

7.5.3. Resonancia en paralelo

Para conseguir que un circuito, como el de la Figura 7.38, oscile en paralelo, se ha de conseguir que las reactancias del condensador y de la bobina sean iguales.

En el caso de que la resistencia óhmica de la bobina sea prácticamente nula, la intensidad total absorbida por el conjunto es también prácticamente nula y el circuito se comporta como si estuviese abierto, es decir, con una impedancia infinita.

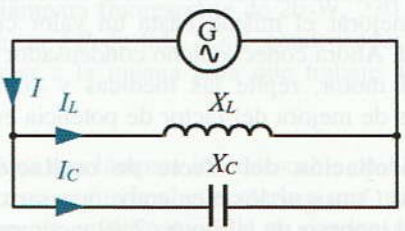


Figura 7.38. Circuito resonante en paralelo.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 7.9

Determina la frecuencia de resonancia de un circuito paralelo como el de la Figura 7.38 si está compuesto por una bobina de 10 mH de inductancia y un condensador de 100 μF.

Solución: Al igual que en el circuito serie, la frecuencia de resonancia se alcanza para:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{10 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = 159 \text{ Hz}$$

El circuito resonante en paralelo se puede utilizar, por ejemplo, para sintonizar una determinada emisora de radio. Lo que hace el circuito, en este caso, es separar una determinada frecuencia (la de resonancia) de entre la mezcla de frecuencias que aparece entre los terminales de una antena de un receptor de radio. Para ello se conecta en paralelo con la antena y tierra el circuito paralelo resonante, el cual presenta una impedancia muy baja para todas aquellas frecuencias que no sean la resonante, por lo que las cortocircuita y las elimina. Sin embargo, para la frecuencia de resonancia, la impedancia se hace muy elevada, por lo que la señal aparece íntegramente en antena.

Si se conectan en serie los circuitos oscilantes en paralelo con una determinada carga, al aplicar al circuito formado una señal con múltiples frecuencias, éste consigue bloquear la frecuencia propia de resonancia, ya que presenta una impedancia muy elevada para dicha frecuencia. Este tipo de circuitos se utilizan como filtros cuando se desea suprimir ciertas señales de una determinada frecuencia que pueden ser molestas, como por ejemplo en altavoces de audio, amplificadores, etc.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

7.1 Verificación de circuitos R-L-C en C.A.: Realiza el montaje de un circuito en serie con bobinas, condensadores y resistencias. Utiliza el polímetro para medir las intensidades y las tensiones de las diferentes partes del circuito; y con las relaciones estudiadas en apartados anteriores averigua la impedancia, el ángulo de desfase entre V e I y el factor de potencia. Comprueba también las relaciones entre las tensiones del circuito y dibuja los correspondientes diagramas vectoriales. Consigue un osciloscopio y comprueba los ángulos de desfase que se producen en cada uno de los elementos, así como el desfase total entre V e I.

7.2 Mejora del factor de potencia: Conecta un motor monofásico y mide la tensión, la corriente y la potencia consumida. Calcula el factor de potencia y dimensiona el condensador que sería necesario conectar para mejorar el mismo hasta un valor cercano a la unidad. Ahora conecta dicho condensador en paralelo con el motor, repite las medidas y comprueba los efectos de mejora del factor de potencia en el motor.

7.3 Comprobación del efecto de oscilación amortiguada: Consigue los elementos necesarios para realizar el montaje de la Figura 7.49 y comprueba experimentalmente el efecto de oscilación amortiguada que aparece, al aplicar un condensador cargado a una bobina.

7.4 Resonancia en serie: Se trata de que consigas poner en resonancia a un circuito en serie. Para ello conecta en serie una resistencia, una bobina y un condensador a un generador de señales. Mide la tensión que aparece en la bobina y el condensador, así como la corriente y la frecuencia aplicada. Comienza el ensayo aplicando una frecuencia muy baja, aumentando dicha frecuencia muy poco a poco hasta conseguir que las tensiones que aparecen en la bobina y el condensador sean iguales. Una vez conseguido esto, anota la frecuencia de resonancia a la que se ha conseguido. Observa cómo, en todo el proceso, la corriente por el circuito ha alcanzado su valor máximo para la frecuencia de resonancia. En previsión de que las tensiones alcanzadas sean elevadas, conviene tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes o daños en los aparatos de medida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades, deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para su adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

AUTOEVALUACIÓN

7.1 ¿Qué elementos producen potencia reactiva en un circuito de C.A.?

A ❑ Un horno eléctrico.

B ❑ Un motor.

C ❑ Un contactor.

7.2 La potencia aparente se mide en:

A ❑ VAR.

B ❑ VA.

C ❑ W.

7.3 ¿Qué nombre se le da a la potencia que realmente se transforma en energía útil en el receptor?

A ❑ Potencia activa.

B ❑ Potencia aparente.

C ❑ Potencia reactiva.

7.4 Se conectan en serie una resistencia de 50 Ω y una bobina de 250 mH a una red de C.A. de 220 V, 50 Hz. Averigua: Z, I, φ, V_R, V_L, P, Q, S, FP y dibuja el diagrama vectorial.

7.5 Se conectan en serie una resistencia de 10 kΩ y un condensador de 150 nF a una red de C.A. de 100 V, 60 Hz. Averigua: I, V_R, V_C, P, Q, S, FP y dibuja el diagrama vectorial.

7.6 Se conectan en serie una resistencia de 10 Ω, un condensador de 100 µF y una bobina de 200 mH a un generador de C.A. de 220 V, 50 Hz. Averigua: I, V_R, V_C, V_L, P, Q, S, FP y dibuja el diagrama vectorial. ¿Qué tipo de reactancia predomina en el circuito?

7.7 El motor de un montacargas posee las siguientes características: $P = 2$ kW; $V = 125$ V; $I = 22$ A. Averigua el factor de potencia.

7.8 Para que una lámpara incandescente de 125 V/60 W no se funda al conectarla a una red de 220 V, se conecta en serie con ella un condensador. Averigua las características del condensador.

7.9 Se conectan en serie las bobinas de dos electroimanes a 220 V, 50 Hz de las siguientes características: bobina n.º 1 ($R = 20$ Ω; $L = 0{,}8$ H), bobina n.º 2 (28 Ω; 0,6 H). Calcula la corriente que fluye por ellas, la tensión aplicada a cada bobina, el factor de potencia del conjunto, así como las potencias del conjunto.

7.10 La bobina de un filtro posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 henrios y una resistencia óhmica de 100 ohmios. Calcula la intensidad, el factor de potencia y las potencias al aplicar una C.A. senoidal de $v = 311 \operatorname{sen} 314\ t$. Dibuja los diagramas vectoriales.

7.11 Se conecta en serie, con la resistencia de un calefactor de 160 Ω, un condensador de 35 µF a una red de C.A. de 220 V, 50 Hz. Averigua la tensión a la que quedará sometido el calefactor. ¿Qué frecuencia habrá que aplicar al conjunto para conseguir que el calefactor trabaje a 125 V sin modificar el valor de la tensión aplicado al conjunto?

7.12 La bobina de un relé de 125 V posee una resistencia de 60 Ω y un coeficiente de autoinducción de 0,2 H. ¿Cuál será el valor de la resistencia óhmica que habrá que conectar en serie para poder conectar dicha bobina a una red de 220 V, 50 Hz sin que se vea afectado su funcionamiento?

7.13 ¿Cuál es la razón por la que se eleva el factor de potencia de las instalaciones eléctricas?

A ❑ Para reducir la potencia que transportan las líneas eléctricas.

B ❑ Para aumentar la potencia aparente y reducir la corriente por la línea.

C ❑ Para reducir la potencia aparente y la corriente por la línea de alimentación.

7.14 El motor de un montacargas posee las siguientes características: $P = 2$ kW; $V = 125$ V; $I = 22$ A. Averigua el factor de potencia.

7.15 El alumbrado de una nave industrial consiste en 20 lámparas de vapor de mercurio de 500 W cada una con un factor de potencia de 0,6 a 230 V y 50 Hz. Averigua las características de la batería de condensadores para conseguir elevar el factor de potencia de la instalación hasta 0,95, así como la intensidad de corriente de la instalación antes y después de la corrección del factor de potencia.

7.16 Una lámpara fluorescente de 20 W, 230 V y 50 Hz posee un FP de 0,6. ¿Qué condensador habrá que conectar a la misma para que trabaje a un FP de 0,9?

7.17 Para que una lámpara incandescente de 125 V/60 W/50 Hz no se funda al conectarla a una red de 230 V, se conecta en serie con ella un condensador. Averigua las características del condensador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

7.18 Averigua la frecuencia de resonancia de un circuito serie formado por un condensador de 20 µF, una bobina de 80 mH y una resistencia de 2 Ω. ¿Qué valor tendrán las caídas de tensión en la bobina y el condensador si aplica al conjunto una tensión de 100 V?

7.19 Se desea conseguir que un circuito paralelo entre en resonancia a una tensión alterna de 50 Hz, para lo que se dispone de una bobina de 1 H. ¿Qué capacidad deberá poseer el condensador?

AMPLIACIÓN

7.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 7*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

7.2 Busca en Internet catálogos comerciales sobre condensadores y baterías automáticas de condensadores para la mejora del factor de potencia. Observa sus características y relaciónalas con las actividades realizadas en esta unidad didáctica.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

8

Sistemas trifásicos

A diferencia de los sistemas monofásicos de C.A., estudiados hasta ahora, que utilizan dos conductores eléctricos para su distribución y consumo, los sistemas trifásicos utilizan tres o cuatro conductores. En la práctica, no existen alternadores monofásicos para la producción de grandes cantidades de energía. Las centrales eléctricas se valen de alternadores trifásicos para la generación de la electricidad que posteriormente se consume en el sector industrial y doméstico, tanto en forma trifásica como monofásica. Como estudiaremos a continuación, las líneas monofásicas se obtienen a partir de un sistema trifásico.

Contenido

8.1. Ventajas del uso de sistemas trifásicos
8.2. Generación de un sistema de C.A. trifásica
8.3. Conexión de los receptores
8.4. Correción del factor de potencia
8.5. Componentes armónicas en C.A.
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Distinguir los sistemas trifásicos de los monofásicos, describiendo los procesos de generación de la energía eléctrica de los primeros.
- Enumerar las ventajas de los sistemas trifásicos de C.A. frente a otro tipo de sistemas de producción, transporte y consumo de la electricidad.
- Resolver problemas prácticos de instalaciones eléctricas con redes trifásicas de C.A.
- Identificar las formas de conexión de los receptores trifásicos.
- Identificar los armónicos y sus efectos.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

8.1 Ventajas del uso de sistemas trifásicos

Lo más característico de los sistemas trifásicos es que las líneas utilizan tres o cuatro hilos (tres fases más el neutro), y con lo que se pueden obtener dos tensiones diferentes.

En la Figura 8.1 se muestra el aspecto de una línea de C.A. trifásica. Los conductores marcados con los números 1, 2 y 3 pertenecen a cada una de las tres fases del sistema. El conductor marcado con el número 0 pertenece al neutro. En esta línea se han conectado tanto receptores trifásicos como monofásicos.

Se puede comprobar experimentalmente que en un sistema trifásico existen dos tensiones diferentes. Así, por ejemplo, si tomamos un voltímetro y medimos la tensión que existe entre cualquiera de las fases y el neutro de un sistema de distribución de baja tensión (por ejemplo, en el cuarto de contadores de un edificio de viviendas) obtendremos un resultado de 230 V. Sin embargo, si medimos la tensión que aparece entre cualquiera de las fases, comprobaremos que existe una tensión de 400 V (Figura 8.2).

De aquí se deduce que en un sistema trifásico existen en una misma línea dos tensiones diferentes. También se puede comprobar que la tensión entre fases es $\sqrt{3}$ veces mayor que la que aparece entre las fases y el neutro:

$$\frac{400\ \text{V}}{230\ \text{V}} = \sqrt{3}$$

El hecho de que en una misma línea tengamos dos tensiones resulta muy ventajoso, ya que por ejemplo podemos utilizar la tensión más elevada en el sector industrial y, por seguridad, la tensión más baja en el sector doméstico.

Aparte de esta ventaja que nos aportan los sistemas trifásicos, existen otras muchas que expondremos a continuación:

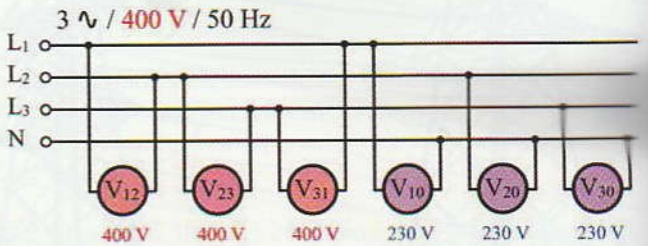


Figura 8.2. **Red trifásica de 400/230 V.**

Tanto los alternadores como los transformadores y motores de C.A. trifásica poseen un mayor rendimiento y, por lo general, son mucho más sencillos y económicos que los monofásicos. Esto se aprecia fundamentalmente en los motores trifásicos de inducción, que son de los más utilizados en el sector industrial. Este motor posee unas características mucho mejores que el monofásico, como: par de arranque muchísimo más fuerte, mejor rendimiento y mejor factor de potencia.

Los sistemas trifásicos consiguen transportar la energía eléctrica con un ahorro considerable en la sección de los conductores.

Todas estas ventajas hacen que en la actualidad toda la energía eléctrica se produzca, transporte, distribuya y consuma en forma de C.A. alterna trifásica.

8.2 Generación de un sistema de C.A. trifásica

Para conseguir una C.A. monofásica se hacía girar una espira en el seno de un campo magnético fijo.

En un sistema trifásico se hacen girar tres espiras en torno a un eje común en el seno de un campo magnético (Figura 8.3). Estas espiras se sitúan repartidas equitativamente

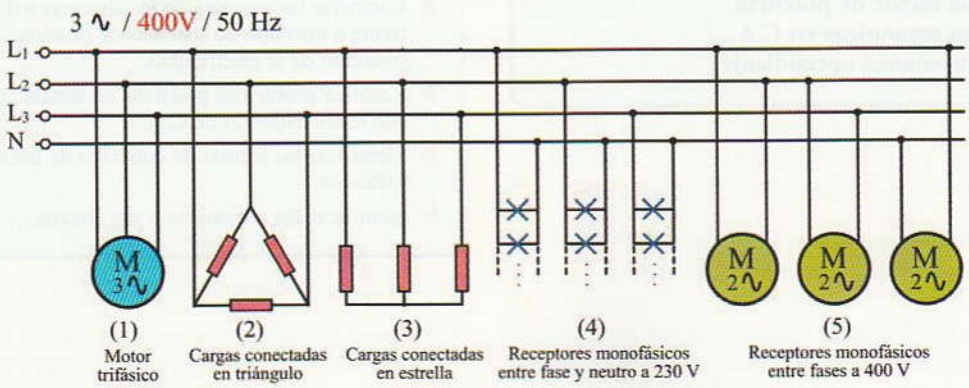


Figura 8.1. **Receptores conectados a una línea trifásica.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

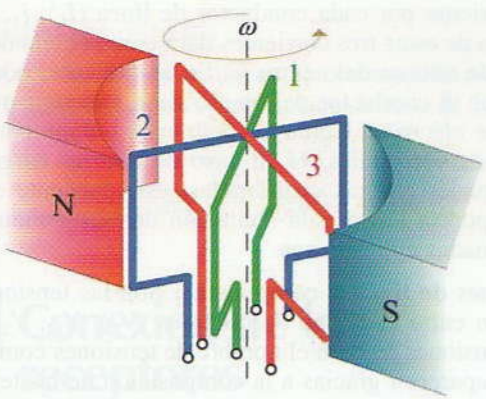


Figura 8.3. **Alternador trifásico elemental.**

sobre un núcleo cilíndrico de chapas de hierro, es decir, cada:

$$\frac{360^\circ}{3} = 120^\circ$$

La corriente puede pasar desde las espiras al circuito exterior por medio de un sistema de anillos colectores y escobillas frotantes.

Al moverse cada una de las espiras en el seno del campo magnético se inducirá en cada una de ellas una tensión senoidal del mismo valor eficaz y frecuencia. Al estar situada cada espira 120° en el rotor, cada una de las tensiones (V_1, V_2 y V_3) inducidas quedan desfasadas temporalmente entre sí también 120° eléctricos, tal como se muestra en el diagrama vectorial de la Figura 8.4.

El valor instantáneo de cada una de estas f.e.m. tendrá la siguiente forma:

$$V_1 = V_{máx} \operatorname{sen} \omega t$$
$$V_2 = V_{máx} \operatorname{sen} (\omega t - 120^\circ)$$
$$V_3 = V_{máx} \operatorname{sen} (\omega t - 240^\circ)$$

Como se puede comprobar en los diagramas vectoriales, la suma de las tres f.e.m. es cero en cualquier momento. Esto constituye una de las características principales del sistema trifásico.

En los alternadores modernos se sitúan las tres bobinas en el estator, evitando así el complejo sistema de anillos colectores para la extracción de la gran energía eléctrica que se produce en las bobinas (las tensiones son del orden de los 10 a 20 kV y las corrientes de hasta cientos de amperios) (Figura 8.5).

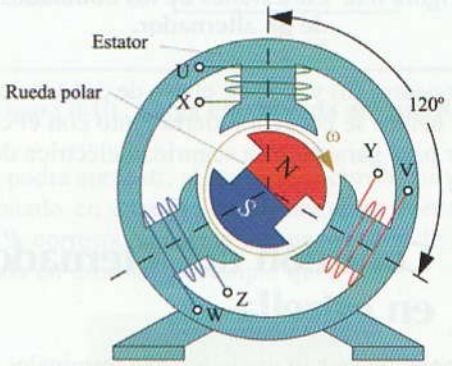


Figura 8.5. **Alternador trifásico con campo magnético inductor móvil.**

En el rotor se sitúa un potente electroimán que, al ser alimentado por una corriente continua, genera el campo magnético. En su movimiento de rotación, el campo magnético corta los conductores de las tres bobinas consecutivamente, induciendo en ellas las tres f.e.m. desfasadas entre sí 120°.

De las tres bobinas del alternador se consiguen seis terminales. Existen dos formas básicas de conexión de estas bobinas: conexión en estrella y conexión en triángulo (Figura 8.6).

La forma más utilizada, y la que estudiaremos a continuación, es la conexión en estrella, ya que permite el uso del

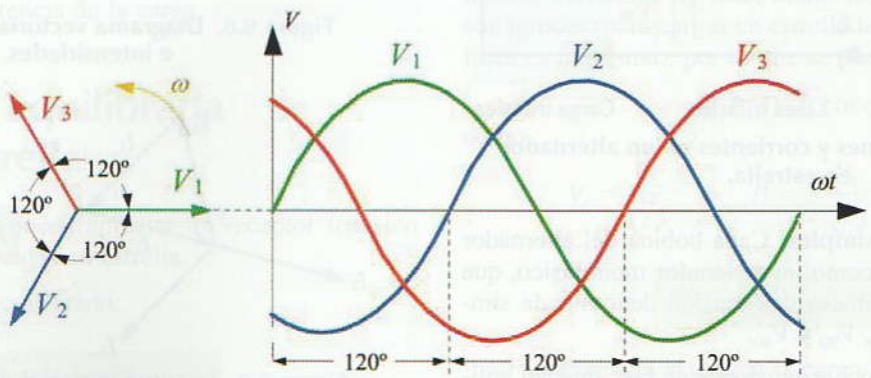


Figura 8.4. **Diagrama vectorial de las tensiones generadas por un alternador trifásico.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

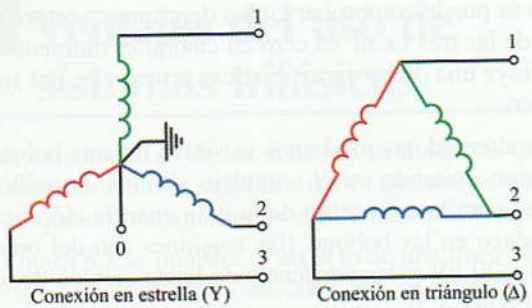


Figura 8.6. Conexiones de los bobinados de un alternador.

conductor neutro (0) y, con él, el uso de dos tensiones diferentes. El neutro se conecta a tierra junto con el chasis del alternador para garantizar la seguridad eléctrica de las instalaciones.

8.2.1. Conexión del alternador en estrella

En esta conexión se han unido los tres terminales libres de las bobinas del alternador a un punto común formando el conductor neutro (0). Las otras partes activas de las bobinas (1), (2) y (3) forman los conductores de cada una de las fases del sistema trifásico. Para hacer un estudio completo de esta conexión, se ha conectado el alternador a un receptor que consta de tres cargas óhmico inductivas (Z_1, Z_2 y Z_3) conectadas entre sí en estrella, tal como se muestra en la Figura 8.7.

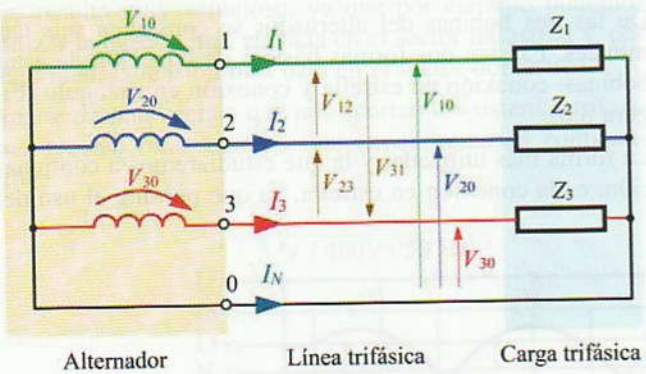


Figura 8.7. Tensiones y corrientes en un alternador en estrella.

Tensiones de fase o simples: Cada bobina del alternador trifásico se comporta como un generador monofásico, que genera entre sus terminales una tensión denominada simple o de fase (V_f): V_{10}, V_{20} y V_{30}.

Intensidades de línea: Las tensiones de fase quedan aplicadas a cada una de las cargas del receptor, apareciendo una corriente por cada conductor de línea (I_L): I_1, I_2 y I_3. La suma de estas tres corrientes dará como resultado la corriente de retorno del neutro I_N. En un principio podría parecer que el conductor del neutro debe conducir una gran corriente eléctrica. Como ya podremos comprobar en los diagramas vectoriales, en el caso de que las cargas sean todas iguales (cargas equilibradas) esta corriente es cero, lo que podría llevar a la anulación de este conductor en determinadas aplicaciones.

Tensiones de línea o compuestas: Son las tensiones que aparecen entre cada una de las fases (V_L): V_{12}, V_{23} y V_{31}. Estas tensiones reciben el nombre de tensiones compuestas porque aparecen gracias a la composición de las tensiones de fase, o tensión de línea, porque es la tensión que aparece entre los conductores de la línea trifásica.

Con ayuda de las leyes de Kirchhoff y del diagrama vectorial, demostraremos que todas estas tensiones poseen el mismo valor eficaz y que están desfasadas entre sí 120°, así como que se cumple que $V_L = \sqrt{3}\, V_f$.

Si nos fijamos en el diagrama vectorial de intensidades de la Figura 8.8, se puede comprobar el hecho de que la suma de estas intensidades es cero (Figura 8.9).

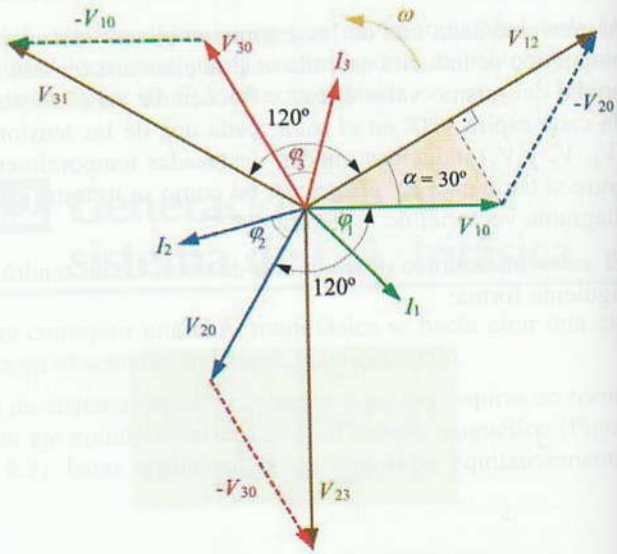


Figura 8.8. Diagrama vectorial de tensiones e intensidades.

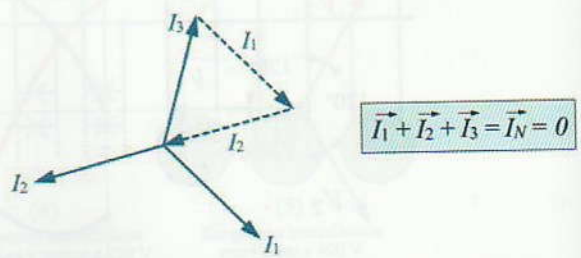


Figura 8.9. La suma vectorial de las corrientes de un sistema equilibrado es igual a cero.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 8.1

Determina la tensión de línea que corresponde a un sistema trifásico que posee una tensión de fase de 133 V.

Solución: $V_L = \sqrt{3}\,V_f = \sqrt{3}\cdot 133 = 230$ V

$\Rightarrow$ ¿y para $V_f = 230$ V?: $V_L = \ldots$

8.3 Conexión de los receptores

Una vez que disponemos de un sistema trifásico, podemos conectarle cargas conectadas entre sí en triángulo, en estrella, o incluso cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro o entre fases (véase la Figura 8.1). En los primeros casos se tratará, en la mayoría de las ocasiones, de cargas trifásicas equilibradas como, por ejemplo, motores trifásicos, hornos trifásicos, etc. Las cargas monofásicas vendrían constituidas por lámparas y todo tipo de receptores monofásicos. En este caso conviene siempre repartir por igual las cargas monofásicas entre cada una de las fases; en caso contrario el sistema sería desequilibrado, produciéndose diferentes corrientes por cada fase, que desestabilizan notablemente el sistema.

Seguidamente estudiaremos las cargas trifásicas conectadas en estrella y en triángulo, y demostraremos que la potencia de estas conexiones para cargas equilibradas es siempre igual a:

$$P = \sqrt{3}\cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica.

V_L = Tensión de línea.

I_L = Intensidad de línea.

$\cos\varphi$ = Factor de potencia de la carga.

8.3.1. Carga equilibrada en estrella

En la Figura 8.10 se puede apreciar un receptor trifásico con tres cargas conectadas en estrella.

Como el sistema es equilibrado:

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_L$$

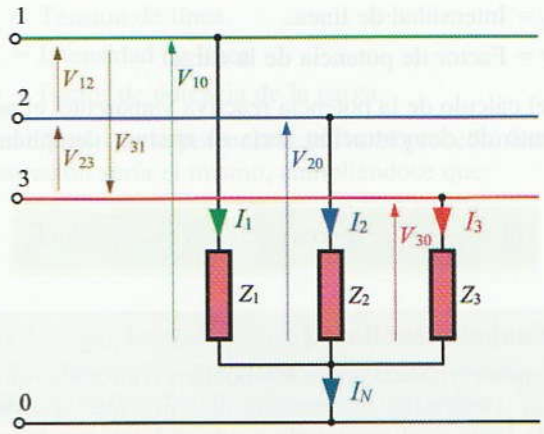


Figura 8.10. Carga equilibrada en estrella.

Como se podrá apreciar, al igual que ocurría con el alternador conectado en estrella, en el diagrama vectorial de la Figura 8.9, correspondiente a las magnitudes de una carga equilibrada en estrella, se cumple que:

$$\vec{I_1} + \vec{I_2} + \vec{I_3} = \vec{I_N} = 0$$

En este caso se puede eliminar el neutro. Al hacerlo se forma un neutro artificial en el punto común de las cargas conectadas en estrella, que permite que se mantenga la tensión de fase entre las fases y el neutro sin necesidad del conductor neutro. Por supuesto, esto sólo ocurre cuando las cargas están equilibradas.

Potencia del sistema trifásico: Para calcular la potencia que desarrolla la carga bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = V_{10} I_1 \cos\varphi_1 + V_{20} I_2 \cos\varphi_2 + V_{30} I_3 \cos\varphi_3$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones de fase, como las corrientes de fase, como los factores de potencia son iguales (para cargas en estrella la corriente de fase y de línea es la misma), por lo que se puede afirmar que:

$$P = 3 V_f I_L \cos\varphi$$

como

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad P = 3\,\frac{V_L}{\sqrt{3}}\, I_L \cos\varphi \quad \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3}\cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica.

V_L = Tensión de línea.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

I_L = Intensidad de línea.

$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga.

Para el cálculo de la potencia reactiva y aparente, el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \qquad S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Actividad resuelta 8.2

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en estrella. Determina la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red con una tensión de línea de 400 V desarrolla una potencia de 10 kW con un *FP* de 0,8. Averigua la potencia reactiva y aparente del motor (véase circuito equivalente en la Figura 8.11).

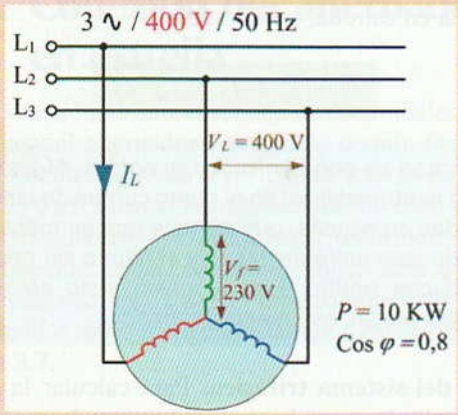


Figura 8.11.

Solución: Como los motores son cargas equilibradas no será necesario conectar el neutro al punto común de la estrella para que aparezca la tensión de fase entre el neutro y cualquiera de las fases.

Para determinar la corriente aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 18 \text{ A}$$

$$\varphi = \arccos 0{,}8 = 36{,}9^\circ$$

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \operatorname{sen} \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 18 \cdot \operatorname{sen} 36{,}9^\circ = 7.488 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_L I_L = \cdots = 12.471 \text{ VA}$$

¿Qué tensión y qué corriente aparecen en cada una de las bobinas del motor?

Como las bobinas están conectadas en estrella y son cargas equilibradas, aparece en cada una de ellas la tensión de fase, es decir:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V}$$

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase I_f) es la misma que aparece en la línea: 18 A.

8.3.2. Carga equilibrada en triángulo

Al conectar las cargas en triángulo (Figura 8.12), éstas quedan sometidas a cada una de las respectivas tensiones de línea. Por cada una de las cargas aparece una corriente: I_{12}, I_{23} e I_{31}, que llamaremos **corriente de fase (I_f)**.

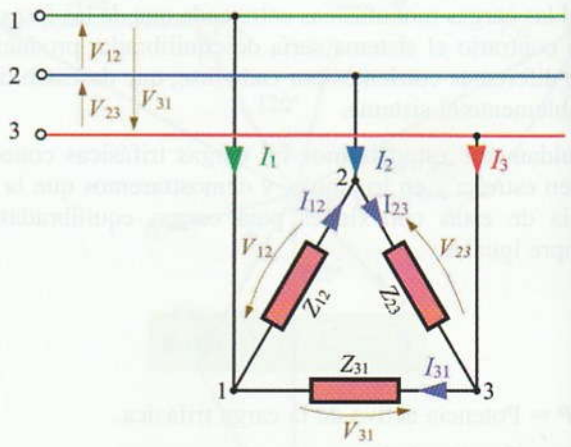


Figura 8.12. **Carga equilibrada en triángulo.**

Como el sistema es equilibrado:

$$|I_{12}| = |I_{23}| = |I_{31}| = I_f$$

En la línea que alimenta a las cargas aparecen otras tres corrientes: I_1, I_2 e I_3, que se corresponden con las corrientes de línea (I_L), en las que también se cumple que: $|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_2$.

Para determinar la relación de estas corrientes con las de fase aplicamos la primera ley de Kirchhoff a cada uno de los nudos que se forman en las conexiones de las cargas en triángulo, dibujamos el diagrama vectorial de la Figura 8.13:

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Nudo 1 $\Rightarrow \quad \overrightarrow{I_1} = \overrightarrow{I_{12}} - \overrightarrow{I_{31}}$

Nudo 2 $\Rightarrow \quad \overrightarrow{I_2} = \overrightarrow{I_{23}} - \overrightarrow{I_{12}}$

Nudo 3 $\Rightarrow \quad \overrightarrow{I_3} = \overrightarrow{I_{31}} - \overrightarrow{I_{23}}$

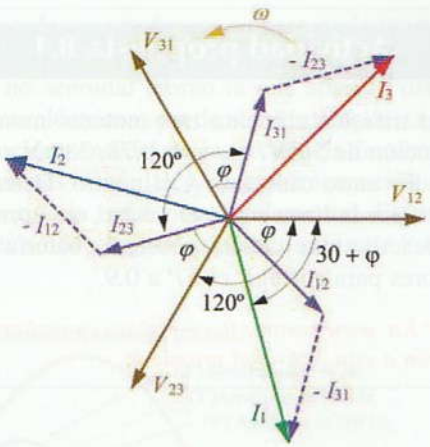


Figura 8.13. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en triángulo.

En este caso, al igual que las tensiones de fase y de línea, se puede comprobar con facilidad que las corrientes de línea son $\sqrt{3}$ mayores que las corrientes de fase.

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$$

Potencia del sistema trifásico: Para calcular la potencia que desarrolla la carga conectada en triángulo bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = V_{12} I_{12} \cos \varphi_{12} + V_{23} I_{23} \cos \varphi_{23} + V_{31} I_{31} \cos \varphi_{31}$$

En un sistema equilibrado, tanto las tres tensiones de línea como las tres corrientes de fase y las tres de línea y los factores de potencia son iguales.

$$P = 3 V_L I_f \cos \varphi$$

como

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad P = 3 V_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica.

V_L = Tensión de línea.

I_L = Intensidad de línea.

$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga.

Para el cálculo de la potencia reactiva el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \operatorname{sen} \varphi \qquad S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

En conclusión, las fórmulas para el cálculo de la potencia en un sistema trifásico equilibrado son las mismas para cargas conectadas en estrella que en triángulo.

Actividad resuelta 8.5

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en triángulo. Determina la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red, con una tensión entre fases de 400 V, desarrolla una potencia de 15 kW con un *FP* de 0,7. Averigua la potencia reactiva y aparente del motor.

Solución: Para determinar la corriente de línea aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos \varphi \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos \varphi} = \frac{15.000}{3 \cdot 400 \cdot 0{,}7} = 31 \text{ A}$$

$$\varphi = \operatorname{arc} \cos 0{,}7 = 45{,}6^\circ$$

$$Q = \sqrt{3}\, V_L I_L \operatorname{sen} \varphi = \cdots = 15.345 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3}\, V_L I_L = \cdots = 21.477 \text{ VA}$$

¿Qué tensión y qué corriente aparecen en cada una de las bobinas del motor? (Figura 8.14).

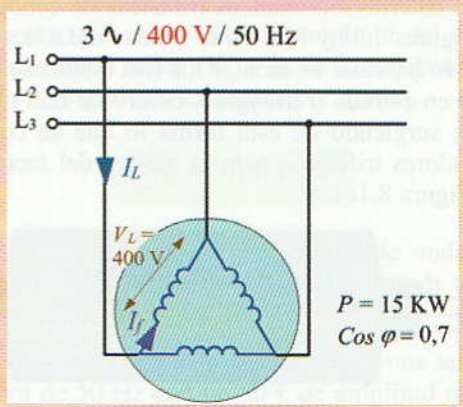


Figura 8.14.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Como las bobinas están conectadas en triángulo, aparece en cada una de ellas la tensión de línea, es decir: 400 V.

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase) es:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{31}{\sqrt{3}} = 17{,}9 \text{ A}$$

8.4 Corrección del factor de potencia

Por las mismas razones por las que se mejora el factor de potencia en las redes de C.A. monofásicas, también se lleva a cabo en las trifásicas. La corrección se lleva a cabo mediante baterías de condensadores, conectados en estrella o en triángulo, que se acoplan en derivación a la red eléctrica a compensar (Figura 8.15).

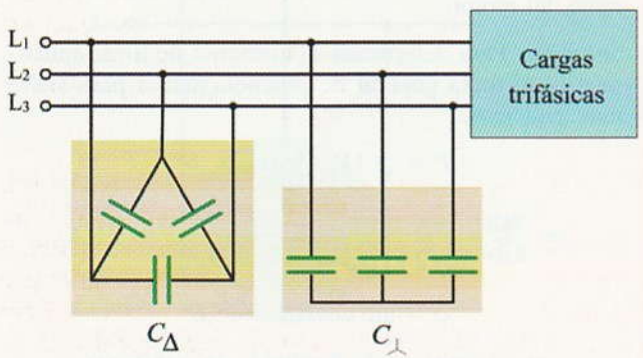


Figura 8.15. Batería de condensadores en triángulo y en estrella para la mejora del factor de potencia.

La forma más habitual de compensar la energía reactiva es mediante baterías automáticas trifásicas de condensadores (véase Figuras 7.33 y 7.34 en la Unidad didáctica 7). En la práctica, lo habitual es montar los tres condensadores, conectados en estrella o triángulo, dentro de una misma envolvente; surgiendo de esta forma lo que se conoce por condensadores trifásicos para la mejora del factor de potencia (Figura 8.16).

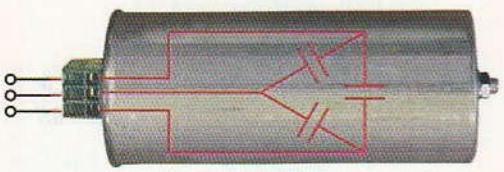


Figura 8.16. Condensador trifásico compuesto por tres condensadores conectados en triángulo.

El procedimiento a seguir para el cálculo de la batería de condensadores trifásica es prácticamente igual que el llevado a cabo para las monofásicas. Dependiendo de que conectemos las baterías en estrella o en triángulo cambiarán algunas de sus características.

Actividad propuesta 8.1

Una red trifásica alimenta tres motores monofásicos de inducción de 5 CV, $\cos\varphi = 0{,}78$, 230 V cada uno, conectados entre cada fase y el neutro. Determina la corriente por la línea y por el neutro, así como la potencia reactiva que deberá poseer la batería de condensadores para corregir el *FP* a 0,9.

*** En www.paraninfo.es podrás consultar la solución a esta Actividad propuesta.*

8.5 Componentes armónicas en C.A.

La tensión senoidal que generan las centrales eléctricas es prácticamente pura; sin embargo ésta sufre alteraciones en las líneas de alimentación de los usuarios que hacen que aparezcan componentes de alta frecuencia.

Estas deformaciones de la tensión senoidal han ido aumentando en los últimos años debido al uso de cargas no lineales. Las cargas no lineales se refieren a un tipo de receptores que al ser conectados a la red eléctrica absorben intensidades de corrientes en impulsos bruscos. Estos cambios bruscos de corriente producen fluctuaciones en la tensión y corriente dando lugar a distorsiones en la forma de onda de las mismas, o lo que se conoce por armónicos.

Las cargas lineales que más habitualmente producen distorsiones armónicas suelen ser las que incorporan equipos de control electrónico. Éstas trocean la señal senoidal con semiconductores de potencia, con el fin de conseguir la regulación deseada, a base de impulsos a una determinada frecuencia (hay corriente-no hay corriente). Entre otras, destacamos seguidamente las cargas no lineales que más habitualmente producen armónicos.

— Alumbrado con balastos electrónicos.
— Fuentes de alimentación conmutadas, ordenadores personales, TV, etc.
— Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI-UPS).
— Rectificadores de potencia para la alimentación de tracción eléctrica con motores de C.C.

© Ediciones Paraninfo
WWW.AUTODIDACTA.INFO

— Reguladores electrónicos de tensión.
— Hornos de arco.
— Transformadores.
— Variadores de velocidad para motores trifásicos de C.A.

El concepto de los armónicos se basa en la teoría matemática de las series de Fourier. Según esta teoría, una función periódica no senoidal (como la que aparece distorsionada en las líneas eléctricas) puede ser descompuesta en la suma de una función senoidal de la frecuencia fundamental y de otras funciones senoidales, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas funciones adicionales se denominan armónicos (Figura 8.17).

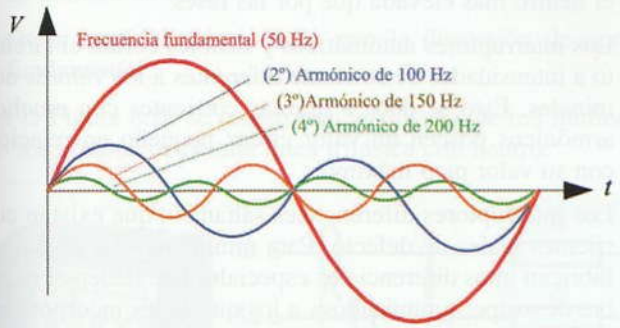


Figura 8.17. Tensión distorsionada y desglosada en su frecuencia principal y armónicos.

Los armónicos son tensiones o corrientes alternas cuya frecuencia resulta ser un múltiplo entero de la frecuencia de la señal senoidal fundamental. Así, por ejemplo, si la frecuencia de la red es 50 Hz, los armónicos podrían ser 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etc.

8.5.1. Características de los armónicos

Las características que definen un armónico son:

Amplitud

Es el valor de la tensión o intensidad del armónico.

Orden

Es el valor de su frecuencia referido a la fundamental (50 Hz). Así, por ejemplo, un armónico de orden 3 posee una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir, 3 × 50 Hz = 150 Hz. En la Tabla 8.1 se expone una clasificación de los armónicos según su orden y frecuencia.

Tabla 8.1. Frecuencia de los armónicos en función de su orden.

Orden	1	2	3	4	5	6	N
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	$50 \cdot N$

En la práctica los armónicos que más afectan a la calidad de energía eléctrica son de orden impar, y de forma especial los que son múltiplos de tres.

Así, por ejemplo, en un sistema trifásico equilibrado a cuatro hilos, lo normal es que la corriente por el conductor neutro sea cero, ya que la suma vectorial de las tres corrientes de fase se anulan. Esto es válido para la componente fundamental, pero no se cumple para los armónicos múltiplos de tres, ya que en este caso se suman, lo que da lugar a intensidades de corriente por el neutro que pueden llegar a ser más elevadas que las de las fases.

En las líneas eléctricas que alimentan equipos no lineales de tipo electrónico, como por ejemplo salas con muchos ordenadores, suelen aparecer armónicos de tercer y noveno orden de gran amplitud, que producen sobrecargas en el neutro que pueden llegar a 1,5 o 2 veces la intensidad que fluye por cada fase.

Si consultamos el REBT, en relación a la sección del neutro, y dado que para una tensión senoidal pura en sistemas equilibrados la corriente por el neutro es nula, podremos comprobar cómo se recomiendan secciones inferiores para el conductor neutro en relación con las de fases. Sin embargo, si en la línea apareciesen una gran cantidad de armónicos habría que tener en cuenta esta circunstancia para dimensionar la sección del neutro.

Porcentaje de tasa de armónico

Es la relación que existe entre la amplitud del armónico de un determinado orden (V_n) y la de la componente fundamental (V) expresada en tantos por ciento:

$$V_n\% = 100 \cdot V_n / V$$

En la Figura 8.18 se muestra la forma de onda de una tensión distorsionada que posee un armónico de tercer orden con una tasa del 20%.

Según Fourier, esta onda sería la suma de una tensión senoidal pura de 50 Hz con un 80% de amplitud más el armónico de tercer orden de 150 Hz con una amplitud del 20%, tal como se muestra en la Figura 8.19.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

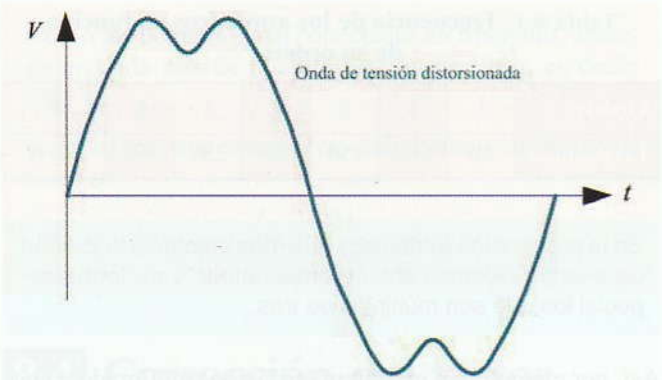


Figura 8.18. Onda de tensión distorsionada por un armónico de tercer oden.

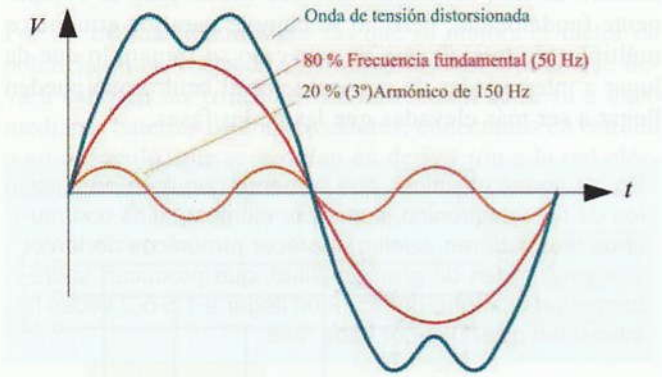


Figura 8.19. Descomposición de la onda de tensión principal.

En la Tabla 8.2 se exponen los niveles máximos permitidos de porcentaje de tasa de armónico (V_n%) en función del número de orden del armónico (N) para baja y media tensión.

Tabla 8.2. Niveles máximos permitidos de tasa de armónicos.

N	V_n %	N	V_n %	N	V_n %
2	2,0	8	0,5	15	0,3
3	5,0	9	1,5	17	2,0
4	1,0	10	0,5	19	1,5
5	6,0	11	3,5	21	0,2
6	0,5	12	0,2	23	1,5
7	5,0	13	3,0	25	1,5

Factor de distorsión armónica total (THD%)

Es un factor que tiene en cuenta la tasa porcentual de todos los armónicos que pueda contener una onda de tensión distorsionada en relación con la componente fundamental. Así, por ejemplo, la tasa de distorsión total (THD%) admitida en los suministros de energía de baja tensión es del 3%.

8.5.2. Efectos que producen los armónicos

La aparición de los armónicos en la red provoca una gran cantidad de problemas, que en muchas ocasiones complica la labor de los instaladores eléctricos, como por ejemplo:

- Aunque las corrientes de fases de un sistema trifásico estén equilibradas aparece una intensidad de corriente por el neutro más elevada que por las fases.
- Los interruptores automáticos y fusibles cortan el circuito a intensidades de corriente diferentes a los valores nominales. Esto se debe a que las corrientes con muchos armónicos poseen un valor eficaz pequeño en relación con su valor pico máximo.
- Los interruptores diferenciales saltan sin que existan corrientes reales de defecto. Para minimizar este efecto se fabrican unos diferenciales especiales que tienen el nombre de «superinmunizados» a los que se les incorpora un filtro con el fin de rechazar las altas frecuencias y evitar disparos innecesarios.
- Los transformadores de potencia y los motores se sobrecalientan aun trabajando por debajo de la potencia nominal.
- Las baterías de condensadores de compensación de energía reactiva se calientan excesivamente y se destruyen.
- Los equipos de electrónica de potencia funcionan de forma incorrecta.
- Los motores pueden producir vibraciones extrañas en su funcionamiento.
- Los conductores de la línea se sobrecalientan debido al aumento del efecto piel. Los armónicos de frecuencia alta hacen que aumente la reactancia inductiva en el interior del conductor, por lo que la corriente eléctrica tiende a fluir por la parte externa de aquél. De esta forma se reduce la sección efectiva del conductor, trayendo consigo un aumento de la resistencia de éste, lo que provoca el aumento de calor generado.

8.5.3. Medida de los armónicos

Un aspecto a tener en cuenta para averiguar los problemas que causan los armónicos es utilizar equipos de media que midan el verdadero valor eficaz o RMS (valor cuadrático medio). Un aparato de medida no preparado podría arrojar

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

resultados en la medida de ondas distorsionadas de hasta un 40% del verdadero valor eficaz.

El verdadero valor eficaz RMS equivale al valor de una corriente continua que produzca el mismo calentamiento que la corriente alterna a medir.

A este efecto existen en el mercado diferentes aparatos de medida, conocidos como analizadores de red, que son capaces de presentar en la pantalla todas las características de los armónicos, como por ejemplo:

- Medida del verdadero valor eficaz RMS.
- Medida del factor de distorsión armónica total (THD%).
- Medida de porcentaje de tasa de armónico en función de su número de orden.
- Otras medidas relacionadas con la distorsión de onda fundamental.

En la Figura 8.20 se muestra un analizador de red midiendo los armónicos de una línea trifásica con neutro.

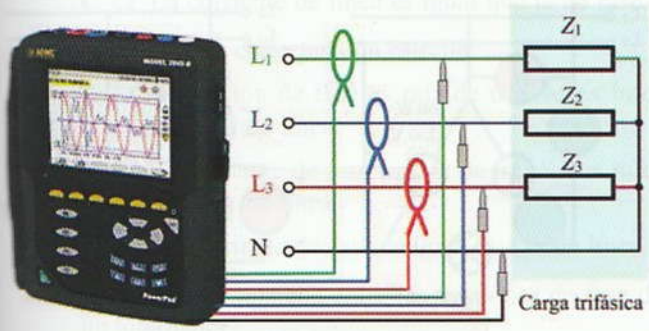


Figura 8.20. Analizador de red midiendo los armónicos con puntas de prueba y pinzas amperimétricas de medida.

8.5.4. Sistemas para la compensación de armónicos

Para evitar la aparición de armónicos lo primero que habría que hacer es prevenir su aparición. Los fabricantes deberían esforzarse en diseñar equipos que generen un menor nivel de armónicos.

En cuanto a los usuarios, una vez detectados altos niveles de armónicos en una instalación eléctrica, se pueden minimizar sus efectos utilizando interruptores diferenciales superinmunizados, aumentar la sección de conductores de fase y en especial la del neutro, utilizar interruptores automáticos multipolares que corten también por la acción de las corrientes del neutro, y la utilización de filtros pasivos y activos que consiguen reducir el nivel de los armónicos.

Filtros pasivos

Los filtros pasivos se pueden construir con la combinación de elementos *R*, *L* y *C*. Así, por ejemplo, las reactancias inductivas conectadas en serie con la carga aumentan su impedancia para las altas frecuencias produciendo un bloqueo de las mismas. Por otro lado, si se conectan condensadores en paralelo con la carga, su reactancia disminuye con la frecuencia y consiguen cortocircuitar las altas frecuencias (Figura 8.21).

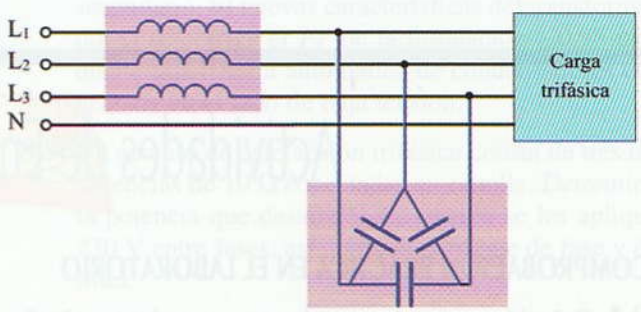


Figura 8.21. Filtros pasivos para la eliminación de armónicos a base de bobinas y condensadores.

Filtros activos

Los filtros activos se construyen a base de sistemas con electrónica de potencia. Estos sofisticados y modernos equipos analizan los armónicos que aparecen en la línea eléctrica e inyectan a ésta la misma corriente armónica detectada con la fase adecuada con el fin de neutralizar totalmente dichos armónicos, tal como se muestra en el esquema simplificado de la Figura 8.22.

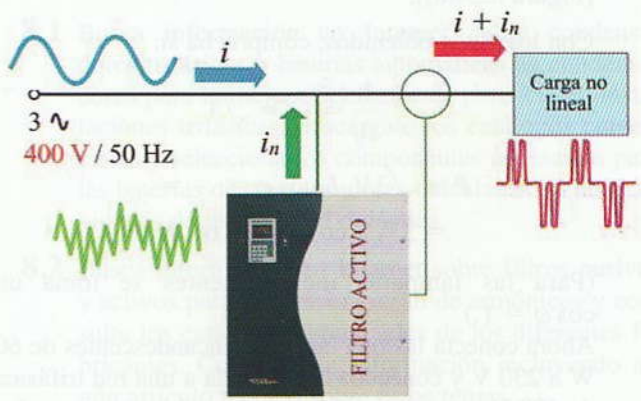


Figura 8.22. Filtro activo para la eliminación de armónicos en una carga no lineal.

Los filtros activos van intercalados en paralelo entre la red y la carga y pueden programarse para corregir un armónico

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

determinado. Para la medida de nivel de armónicos en la red se valen de transformadores de corriente o pinzas de medida, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 8.23.

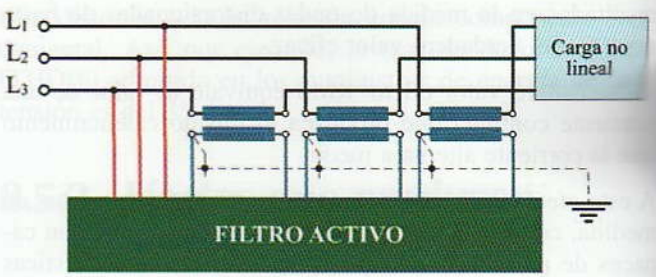


Figura 8.23. **Esquema de conexiones de filtro activo.**

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

8.1 Relación entre las tensiones y corrientes de fase y de línea. Mediante un sencillo montaje vamos a comprobar experimentalmente las relaciones existentes entre las corrientes de línea y de fase, así como la validez de las expresiones generales de potencia trifásica.

Consigue tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en triángulo a una red trifásica de 230 V entre fases. Conecta un amperímetro en una de las líneas (A_L) y otro en una de las lámparas (A_f) con el objeto de medir la intensidad de línea y de fase respectivamente. Conecta también un voltímetro entre fases para comprobar el valor de la tensión de línea [Figura 8.24(a)].

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$\frac{A_L}{A_f} = \cdots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3}\,V_L I_L \cos\varphi = \cdots =$$
$$= 3\,V_L I_f \cos\varphi = 3 \cdot 60 \text{ W}$$

(Para las lámparas incandescentes se toma un $\cos\varphi = 1$.)

Ahora conecta las tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en estrella a una red trifásica de 400 V entre fases. Conecta un voltímetro entre las fases (V_L) y otro entre los bornes de una de las lámparas (V_f) con el objeto de medir la tensión de línea y de fase, respectivamente. Conecta también un amperímetro (A) en una de las líneas para comprobar el valor de la corriente de línea y de fase [Figura 8.24(b)].

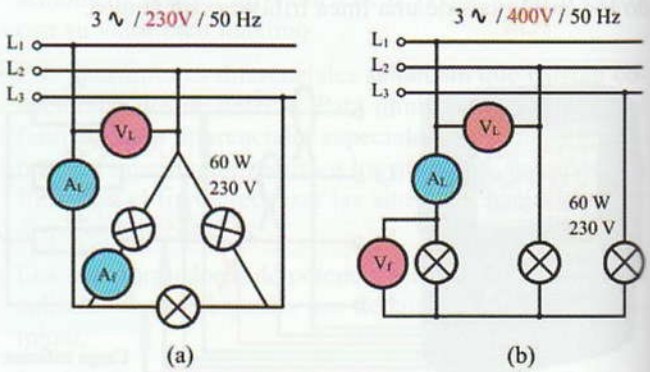


Figura 8.24.

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$\frac{V_L}{V_f} = \cdots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3}\,V_L I_L \cos\varphi = \cdots =$$
$$= 3\,V_f I_f \cos\varphi = 3 \cdot 60 \text{ W}$$

Desconecta una de las lámparas. ¿Qué ocurre? ¿Y si desconectamos dos?

¿Ocurriría lo mismo si conectásemos el neutro al punto común de la estrella?

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

8.2 Analizador para redes trifásicas. Consigue un analizador de red trifásico y, siguiendo las instrucciones del equipo de medida, analiza los niveles de armónicos de alguna carga no lineal.

AUTOEVALUACIÓN

8.1 ¿Qué ventajas presenta el alternador conectado en estrella frente al conectado en triángulo?

A ❑ Presenta un mejor rendimiento.

B ❑ Disponibilidad del conductor neutro y posibilidad de puesta a tierra del mismo.

C ❑ Reduce considerablemente la distorsión en las tensiones de fase.

8.2 En una carga trifásica conectada en triángulo:

A ❑ La tensión de fase es igual que la de línea.

B ❑ La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.

C ❑ La corriente de línea es igual que la de fase.

8.3 En una carga conectada en estrella:

A ❑ La tensión de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.

B ❑ La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea.

C ❑ La corriente de fase es igual que la de línea.

8.4 ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de fase de un alternador?

A ❑ 30°.

B ❑ 90°.

C ❑ 120°.

8.5 ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de línea y de fase que proporciona un alternador conectado en estrella?

A ❑ 30°

B ❑ 90°

C ❑ 120°

8.6 En un sistema trifásico con carga equilibrada se mide una intensidad en la línea de 30 A con un factor de potencia de 0,75. Si la tensión entre fases es 230 V, averigua las potencias de la carga.

8.7 En un sistema trifásico con carga equilibrada a tres hilos se mide una potencia en la línea de 36 kW, una intensidad de 97,4 A y una tensión de 225 V. Averigua el factor de potencia de la carga.

8.8 Una instalación industrial de 50 kW, con un factor de potencia de 0,65, se alimenta a través de un transformador trifásico con una tensión en el primario entre fases de 24 kV y de 400 V en el secundario. Averigua: a) la potencia nominal del transformador en kVA, así como la corriente por el primario y el secundario; b) nuevas características del transformador si se corrige el *FP* de la instalación a 0,98 mediante una batería automática de condensadores conectada en el lado de baja tensión.

8.9 Un aparato de calefacción trifásico consta de tres resistencias de 10 Ω conectadas en estrella. Determina la potencia que desarrollarán cuando se les aplique 230 V entre fases, así como la corriente de fase y de línea.

8.10 ¿Y si conectamos en triángulo las mismas resistencias que en el ejercicio anterior?

8.11 Un motor trifásico de 3.990 W, $\cos \varphi = 0{,}65$ se conecta a una red de 400 V, 50 Hz. Averigua la corriente de línea y de cada fase del motor cuando está conectado en triángulo, así como su potencia reactiva y aparente.

8.12 Un motor trifásico conectado a 400 V consume 56 A. Su potencia es de 29,4 kW. Determina el factor de potencia, potencia reactiva y aparente.

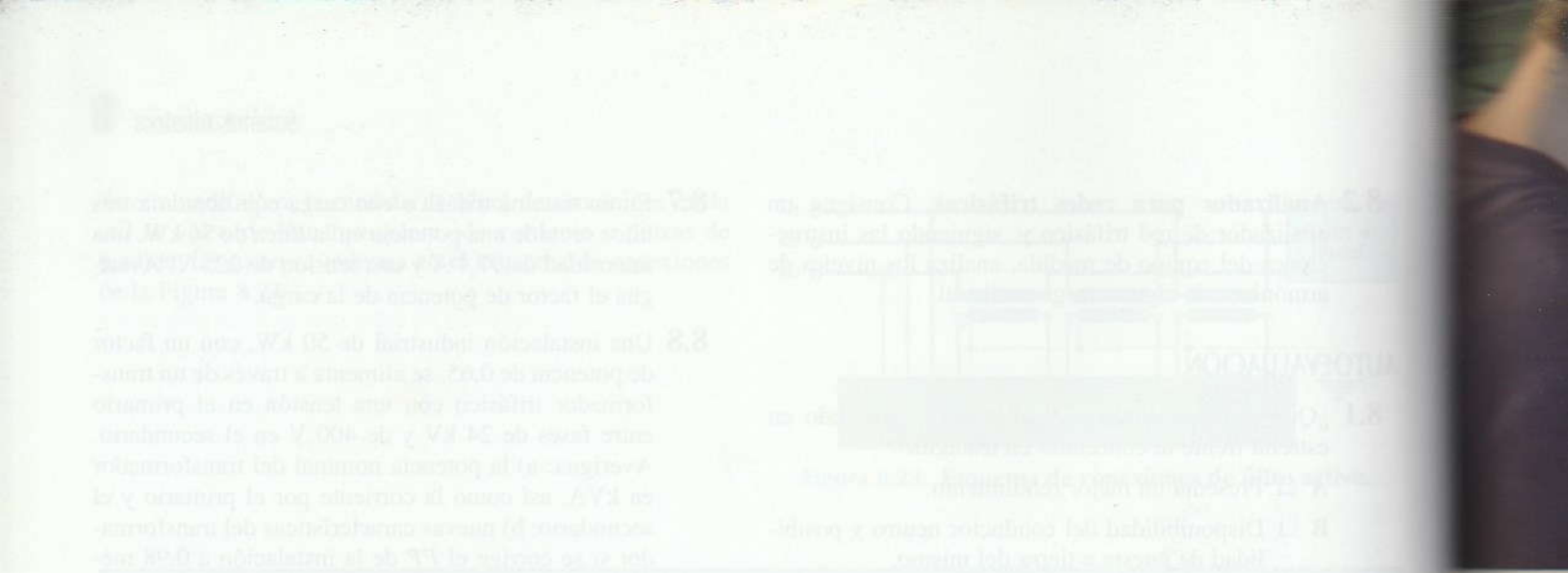
AMPLIACIÓN

8.1 Busca información en Internet sobre condensadores trifásicos y baterías automáticas de condensadores para la mejora del factor de potencia en instalaciones trifásicas; descárgate los catálogos comerciales y selecciona los componentes necesarios para las baterías de condensadores calculadas en las actividades de esta unidad didáctica.

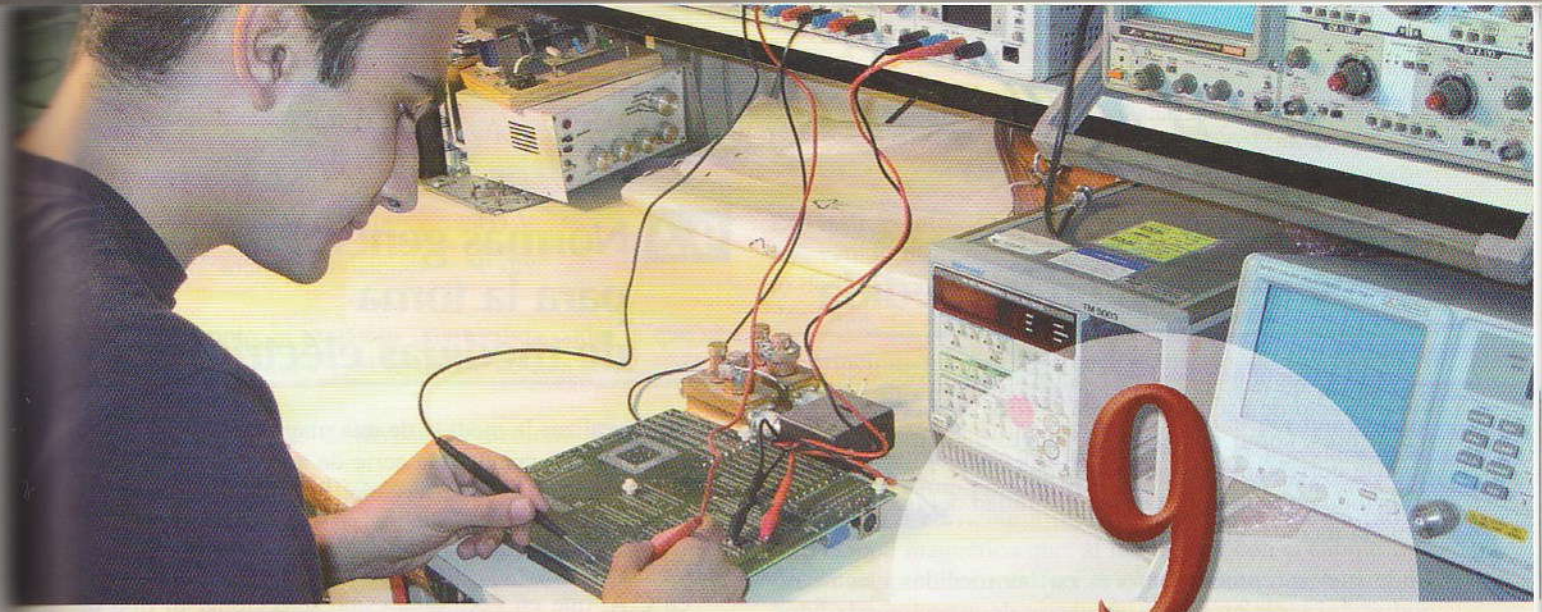
8.2 Busca información en Internet sobre filtros pasivos y activos para la compensación de armónicos y consulta los catálogos comerciales de los diferentes fabricantes. Completa la información incluyendo algún artículo técnico sobre estos temas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

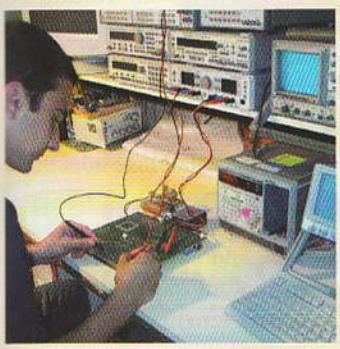


WWW.AUTODIDACTA.INFO



9

Instrumentación en el laboratorio de electrónica



Cualquier laboratorio o taller en el que se diseñen, monten o reparen equipos o circuitos electrónicos debe estar dotado de una selecta variedad de equipos e instrumentos de medida.

Como por ejemplo:

- *Una fuente de alimentación.*
- *Un generador de funciones.*
- *Un polímetro.*
- *Un osciloscopio.*

La medición de las diferentes magnitudes eléctricas de un circuito o dispositivo electrónico nos ayudan a comprobar su buen funcionamiento, detectar y reparar averías, estudiar con detenimiento ciertos procesos que nos ayudan a diseñarlos, así como a evaluar su comportamiento ante eventuales cambios.

Contenido

9.1. Errores absolutos y relativos en la medida
9.2. Normas generales para la toma de medidas eléctricas
9.3. Instrumentos de medida analógicos y digitales
9.4. Medida de la intensidad
9.5. Medidas de tensión
9.6. El polímetro
9.7. El osciloscopio
9.8. Generador de funciones
9.9. Instrumentación digital
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Describir las características más relevantes (tipos de errores, precisión, posición de trabajo, etc.), la tipología, clases y procedimientos de uso de los instrumentos de medida utilizados en los circuitos electrotécnicos básicos.
- Realizar con precisión y seguridad las medidas de las magnitudes eléctricas fundamentales (tensión, intensidad, resistencia, potencia, frecuencia, etc.), utilizando, en cada caso, el instrumento (polímetro, vatímetro, osciloscopio, etc.) y los elementos auxiliares apropiados.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

9.1 Errores absolutos y relativos en la medida

Cuando se toma una medida eléctrica, nunca obtenemos el valor exacto de ésta. Esto es así porque siempre se cometen errores, como por ejemplo, que el aparato de medida no esté correctamente calibrado, que no se haya utilizado el método correcto, por falta de habilidad del operador que toma la medida, etc.

Dado que se cometen errores en las medidas eléctricas, convendrá tener en cuenta una serie de aspectos a la hora de evaluar los resultados.

El error absoluto que se comete en una medida es la diferencia entre el valor leído (V_L) por el aparato de medida y el valor real (V_R) de ésta.

$$E_{ab} = V_L - V_R$$

Para obtener el valor más aproximado al real utilizaremos un aparato de medida patrón de laboratorio.

Actividad resuelta 9.1

Para comprobar el error que comete un voltímetro se toma una medida de 100 V y luego se comprueba con un voltímetro de gran precisión la misma medida, dando como resultado 98 V. Determina el error absoluto cometido por el voltímetro.

Solución:

$$E_{ab} = V_L - V_R = 100 - 98 = 2 \text{ V}$$

Dado que el conocimiento del error absoluto no nos da una idea clara del error cometido, utilizaremos para ello el error relativo, que nos indica la relación porcentual entre el error absoluto y el valor real:

$$E_r\,\% = \frac{E_{ab}}{V_R}\,100$$

Actividad resuelta 9.2

Averigua el error relativo cometido en la medida de la Actividad resuelta 9.1.

Solución:

$$E_r\,\% = \frac{E_{ab}}{V_R}\,100 = \frac{2}{98}\,100 = 2\%$$

9.2 Normas generales para la toma de medidas eléctricas

Antes de realizar la medida de una magnitud eléctrica, habrá que tener en cuenta una serie de aspectos previos que nos garanticen el mejor resultado. Seguidamente exponemos algunas de estas consideraciones:

— Como no todos los aparatos de medida funcionan igual en C.A. que en C.C. habrá que seleccionar el tipo de corriente adecuado en cada caso.

— El campo de medida de un aparato de medida nos indica los valores entre los cuales el aparato mide con exactitud. Antes de realizar una medida habrá que prever con aproximación el orden de magnitud de la medida y con ello seleccionar el aparato más adecuado. Por ejemplo, supongamos que deseamos medir la tensión de una pila. Para ello, seleccionaremos un voltímetro de C.C. con un campo de medida de 0-5 V. Si utilizásemos un voltímetro con un campo de medida de 0-300 V, probablemente no apreciaríamos la medida en la escala.

— Utilizaremos el aparato de medida de la clase adecuada según el orden de precisión que requiera la medida. Hay que tener en cuenta que cuanto más preciso sea el aparato más cara resultará su adquisición. Así, por ejemplo, no será rentable, en ningún caso, utilizar un aparato de clase 0,1 para medir la tensión en una línea de suministro eléctrico.

— Hay que procurar evitar las prisas y anotar los valores obtenidos de la medida de forma ordenada en el formulario previamente preparado.

— Conviene controlar periódicamente los instrumentos de medida, comprobando si mantienen su nivel de precisión.

— Si el aparato es de aguja, conviene observar la posición en la que debe estar el instrumento en el momento de tomar la medida, ya que si no, el peso de la aguja podría influir en el resultado. La posición adecuada aparece inscrita en la pantalla del instrumento con un símbolo.

— En instrumentos con indicación analógica, es importante realizar una estimación previa de la constante de la escala (K) para evitar errores en la estimación de la medida.

En la Figura 9.1 se muestra como ejemplo la pantalla de un voltímetro con un campo de medida de 0-500 V. La constante de escala para este aparato de medida será:

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

$$K = \frac{\text{Fondo de escala}}{\text{N.º total de divisiones}} = \frac{500\ \text{V}}{50\ \text{div}} = 10\ \text{V/div}$$

Así, por ejemplo, si tomamos una medida como la que se muestra en la Figura 9.1, el resultado de ésta sería:

$$\text{Medida} = \text{N.º de divisiones medidos} \cdot K =$$

$$= 27 \cdot 10\ \text{V/div} = 270\ \text{V}$$

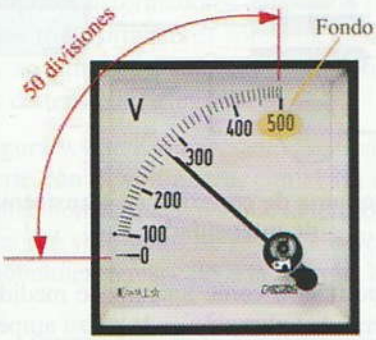


Figura 9.1. Voltímetro de 500 voltios de fondo de escala y 50 divisiones con una lectura de 27 div.

9.3 Instrumentos de medida analógicos y digitales

Los instrumentos de medida analógicos son aquellos que presentan la medida mediante una aguja móvil que se desplaza por una escala graduada [véase la Figura 9.2(a)]. En los instrumentos de medida digitales el resultado de la medida se puede leer como una cifra numérica (dígitos) en una pantalla [véase la Figura 9.2(b)].

(a) (b)

Figura 9.2. Instrumento de medida: (a) analógico, (b) digital.

Los instrumentos de medida analógicos son los que más se han venido utilizando hasta ahora, aunque el abaratamiento de los circuitos integrados está haciendo que éstos queden cada vez más relegados por los digitales.

El principio general de funcionamiento de los aparatos analógicos es el siguiente (véase la Figura 9.3): por lo general, la corriente a medir se hace circular por una bobina que puede girar sobre un eje. Esta bobina se introduce en el seno de un campo magnético, que puede ser generado por un imán. La corriente a medir genera en la bobina móvil otro campo magnético que, al interactuar con el campo fijo del imán, produce una fuerza que tiende a desplazar a la bobina móvil en un determinado sentido. Solidaria a la bobina móvil se fija la aguja medidora sobre una escala graduada. Además se incluye un muelle, generalmente de forma circular, que se opone al movimiento de la aguja. La fuerza antagonista que desarrolla el muelle es proporcional a su estiramiento. Por otro lado, la fuerza que hace girar la aguja es proporcional a la corriente a medir. Cuando los pares de fuerzas de la bobina y del muelle antagonista se igualan, se obtiene la medida leyendo el desplazamiento de la aguja sobre la escala graduada.

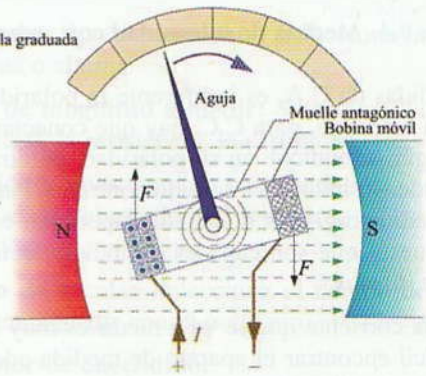


Figura 9.3. Instrumento de medida de bobina móvil.

En los instrumentos digitales no existe ningún elemento mecánico. La medida se realiza gracias a complejos circuitos electrónicos en forma de circuitos integrados. El resultado de la medida se presenta en una pantalla o *display* en forma de cifra numérica o dígitos.

Los instrumentos de medida digitales presentan varias ventajas que les hacen ideales para la mayoría de las aplicaciones. Por lo general, son más precisos que los analógicos. La lectura de la medida es mucho más cómoda, ya que leemos directamente la cifra en la pantalla sin tener que interpretar una escala graduada. Esto los hace ideales en su uso como aparatos portátiles, donde es muy importante tomar una lectura rápida y precisa de la medida. Son muy robustos, aguantan impactos fuertes y vibraciones sin alteración de su funcionamiento. Esto último se debe a que en su estructura no existen elementos móviles.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Los instrumentos de medida analógicos tienden a ser sustituidos cada vez más por los digitales, sobre todo, en los aparatos de medida portátiles.

9.4 Medida de la intensidad

La medida de la intensidad se realiza mediante el amperímetro. Se conecta en serie con el circuito cuya corriente se quiere medir, tal como se indica en la Figura 9.4. Es aconsejable que la resistencia interna del instrumento de medida (R_A) sea lo más baja posible. De esta forma, se evitan caídas considerables de tensión (V_A) en el amperímetro y consumos de potencia elevados.

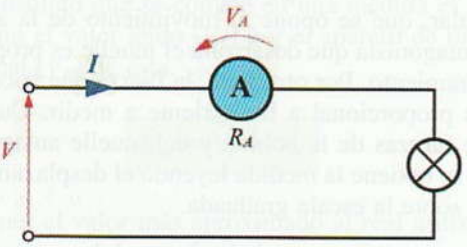


Figura 9.4. **Medida de intensidad con amperímetro.**

Para medidas de C.A. es indiferente la polaridad de conexión. Sin embargo, para C.C. hay que conectar el amperímetro según se indique en su polaridad, de otra manera la aguja tenderá a indicar en sentido contrario. Para los aparatos de medida digitales no es tan importante esta consideración, puesto que son capaces de indicar lecturas negativas en su *display*.

Cuando la corriente que se va a medir es muy elevada, resulta difícil encontrar el aparato de medida adecuado para realizar una medida directa. En estos casos se recurre a sistemas de apoyo que consiguen ampliar el alcance de medida sin cambiar de amperímetro. Para corriente continua se emplean los shunts y para corriente alterna los transformadores de intensidad.

El shunt consiste en conectar una resistencia de muy bajo valor óhmico (R_{Shunt}) en paralelo con el amperímetro que consiga desviar parte de la corriente (I_S) que se quiere medir (I) (véase Figura 9.5).

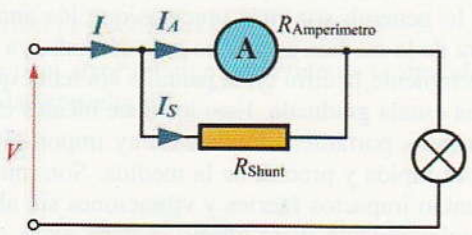


Figura 9.5. **Esquema de conexión de un shunt.**

En la Figura 9.6 se ha conectado un transformador de intensidad en la línea con el objeto de medir la corriente elevada que fluye por la misma. El transformador de intensidad consta de dos circuitos: el primario se conecta en serie con la línea donde se quiere medir la corriente y el secundario que se conecta entre los extremos del amperímetro. Recuerda que este sistema de medida sólo funciona cuando la corriente es alterna.

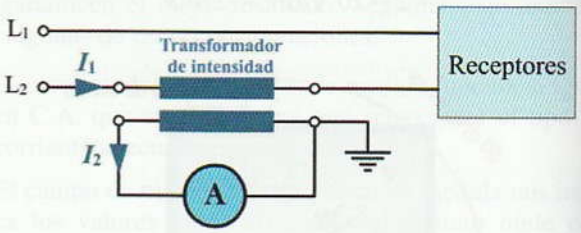


Figura 9.6. **Esquema de conexión de transformador de intensidad.**

En cuanto al amperímetro como aparato de medida portátil, el de más extendida aplicación es la pinza amperimétrica (véase Figura 9.7). Con este aparato de medida se evita tener que cortar y realizar conexiones para la toma de la medida. Esto se consigue gracias a que el aparato de medida lleva incorporado un transformador de intensidad del tipo pasante. Para hacer pasar el conductor por el hueco del transformador se abre manualmente el núcleo magnético de la pinza y se vuelve a cerrar. Este aparato de medida resulta muy cómodo para realizar comprobaciones rápidas de la intensidad de los circuitos, ya que no es necesario interrumpir el circuito para ello. Hoy en día se fabrican pinzas amperimétricas tanto para C.A. como para C.C.

Figura 9.7. **Pinza amperimétrica.**

9.5 Medidas de tensión

La medida de tensión se realiza mediante el voltímetro. Se conecta entre los extremos cuya tensión se quiere medir, tal como se indica en la Figura 9.8. Es importante que la resistencia del instrumento de medida (R_V) sea alta, para así evitar consumos de corriente (I_V) y potencias elevadas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

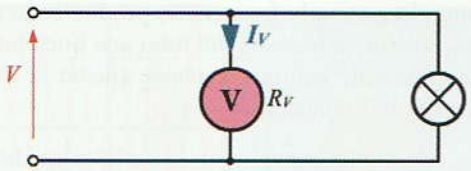


Figura 9.8. **Medida de tensión con voltímetro.**

Para ampliar el alcance de un voltímetro, se recurre a la conexión en serie de resistencias adicionales (Figura 9.9) o al empleo de transformadores de tensión (Figura 9.10). Dado que los transformadores sólo funcionan para corrientes alternas, se utilizarán sólo transformadores para realizar medidas de tensiones elevadas en C.A.

En la Figura 9.9 se ha conectado una resistencia adicional R_S en serie con el voltímetro, con el fin de conseguir una caída de tensión V_S que haga que la tensión V_V que aparece en bornes del voltímetro de resistencia R_V quede reducida proporcionalmente respecto a la tensión V a medir.

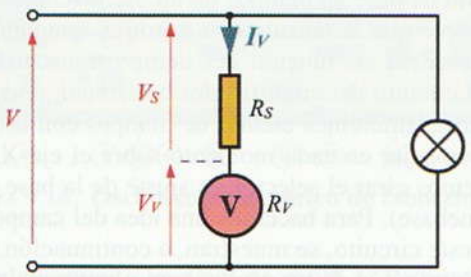


Figura 9.9. **Esquema de conexión de voltímetro con resistencias adicionales.**

En la Figura 9.10 se ha conectado un transformador de tensión en la línea con el objeto de medir la tensión elevada que existe en la línea. El transformador de tensión consta de dos circuitos: el primario se conecta entre los extremos de la línea donde se quiere medir la tensión, y el secundario, que se conecta entre los extremos del voltímetro.

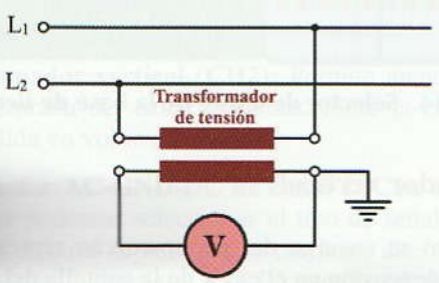


Figura 9.10. **Esquema de conexión de transformador de tensión.**

9.6 El polímetro

El polímetro o multímetro es un aparato de medida portátil que se utiliza para medir diferentes magnitudes eléctricas, como, por ejemplo, la tensión y las corrientes en C.C. y C.A., resistencia, capacidad, prueba de continuidad, prueba de diodos y transistores. La misma palabra indica su función: «polí-metro», muchas medidas.

A primera vista da la impresión de que debe de existir mucha diferencia entre manejar un modelo de polímetro u otro. Pero no es así, ya que en el momento que se adquiere una cierta práctica en el manejo de uno de los modelos, prácticamente ya se saben manejar todos.

Los polímetros digitales presentan una lectura en forma de cifras numéricas que facilita bastante la interpretación de la medida. En los polímetros analógicos o de aguja hay que elegir la escala adecuada y tener cuidado en no equivocarse con la constante de escala a aplicar.

En la Figura 9.11 se muestra la disposición de un polímetro genérico de laboratorio:

1. **Conmutador tipo de corriente:** Selecciona la corriente continua o alterna.
2. **Selector de magnitud a medir:** Selecciona la tensión, la intensidad, la resistencia, la capacidad, etc.
3. **Continuidad:** Selecciona la continuidad de circuitos y la verificación del estado de los diodos, así como de su polarización.
4. **Selección de escala:** Selecciona el campo de medida que podemos medir con el polímetro.
5. **Interruptor de encendido.**
6. **Conexión de las puntas de prueba. Entrada:** Terminal negro al negativo y el rojo al positivo.
7. **Conexión para medida de capacidades en condensadores.**
8. **Pantalla.**

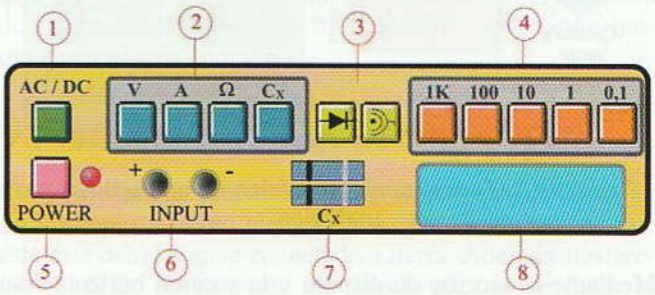


Figura 9.11. **Polímetro genérico de laboratorio.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

9.7 El osciloscopio

El osciloscopio es un aparato de medida que nos resultará indispensable para el análisis y la comprobación de los valores que se dan en una tensión variable. Su aplicación en el campo de la electrónica se hace indispensable. Lo que hace un osciloscopio es mostrar en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica. Es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo.

Así, por ejemplo, la imagen que aparecería en la pantalla de éste al aplicarle una tensión alterna senoidal sería la mostrada en la Figura 9.12

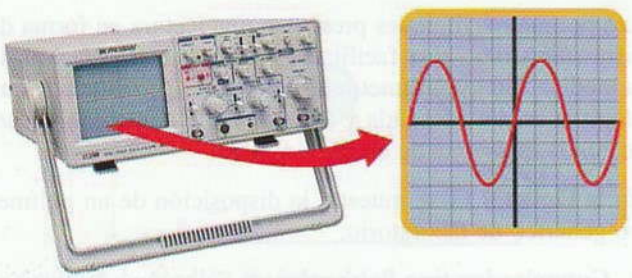


Figura 9.12. Imagen de una tensión senoidal en un osciloscopio.

El osciloscopio se vale de un tubo de rayos catódicos, sobre el cual incide un haz electrónico proyectado por el cátodo, para reproducir la imagen visual, tal como se muestra en la Figura 9.13.

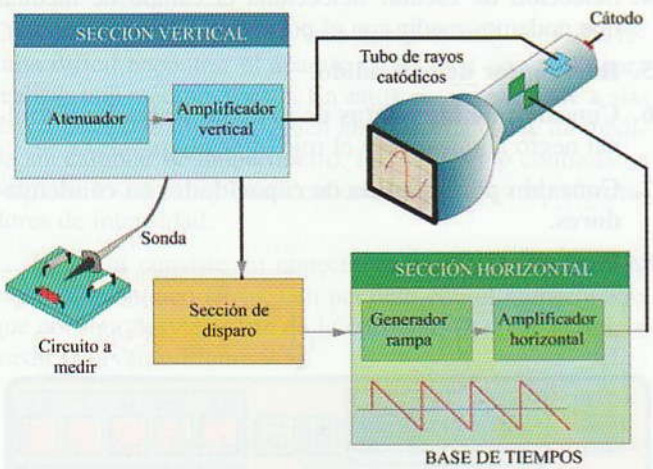


Figura 9.13. Funcionamiento básico de un osciloscopio analógico.

Mediante la sección de disparo y la sección horizontal se consigue generar una señal que es capaz de mover el haz de electrones, proyectado por el cátodo, de izquierda a derecha a una determinada frecuencia, produciendo en la capa fluorescente de la pantalla del tubo una línea horizontal. Mediante la base de tiempos se puede ajustar la frecuencia de barrido del haz electrónico.

La sonda del osciloscopio toma la señal a medir, que se prepara en la sección vertical, para atacar las placas de deflexión vertical. Esto hace que el haz de electrones tienda a desviarse de arriba abajo en el tubo de rayos catódicos en función del orden de magnitud de la señal a medir (tensión en voltios). Mediante el amplificador vertical se consigue atenuar más o menos la señal a medir. Si la tensión a medir es positiva, el trazo presentado en la pantalla aparece por encima de la línea de referencia GND y si es negativa, por debajo de dicha línea.

La combinación del trazo vertical y el horizontal producen en la pantalla la representación gráfica de la señal a medir.

Base de tiempos y amplificador horizontal

El circuito de base de tiempos de un osciloscopio es el que hace posible que la tensión que nosotros queremos representar aparezca en función del tiempo transcurrido. Mediante el circuito del amplificador horizontal, podemos seleccionar las diferentes escalas de tiempos con las que nos interese trabajar en cada momento sobre el eje X, para lo que hacemos girar el selector de ajuste de la base de tiempos (Timebase). Para hacernos una idea del campo de medida de este circuito, se muestran, a continuación, los grados de desviación de un osciloscopio comercial: desde 1 a 500 ms/división, desde 1 a 500 µs/div y desde 100 a 500 ns/div.

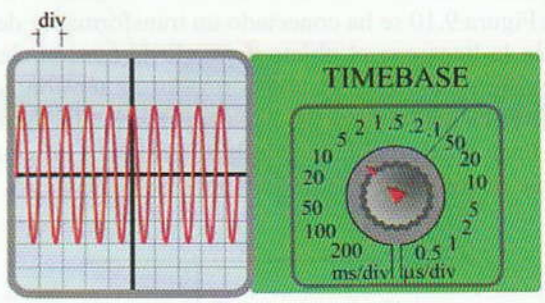


Figura 9.14. Selector de ajuste de la base de tiempos.

Amplificador vertical

Este circuito se encarga de que aparezcan representados los valores de tensión en el eje Y de la pantalla del osciloscopio. Mediante este circuito, también podemos seleccionar diferentes escalas de tensión, como por ejemplo: 1 a 10 V/div y de 2 a 500 mV/div.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

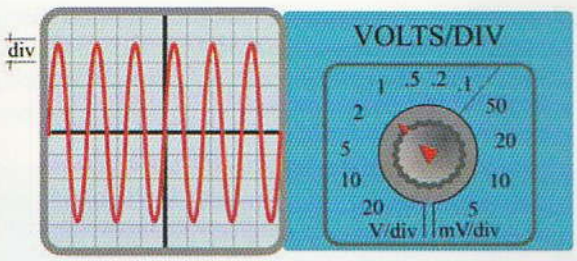


Figura 9.15. Selección del atenuador de entrada vertical.

En la Figura 9.16 presentamos lo que podría ser un osciloscopio genérico, con sus controles más característicos, de forma que nos permita familiarizarnos con éstos.

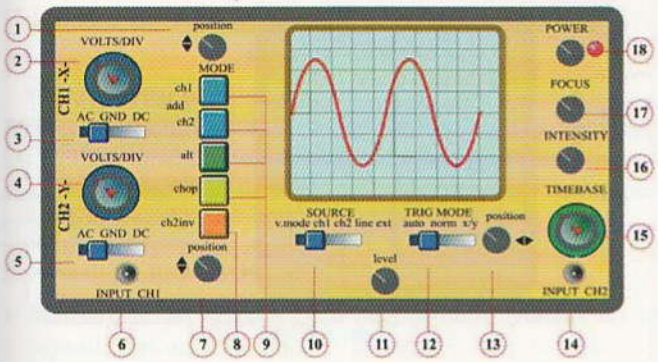


Figura 9.16. Osciloscopio genérico de laboratorio.

1. **Desplazamiento vertical de canal 1:** Permite desplazar la señal del canal 1 en sentido vertical.
2. **Atenuador vertical (CH1):** Permite atenuar la señal de entrada del canal 1 y seleccionar la constante de medida en voltios/división.
3. **Selector AC-GND-DC de canal 1:** Con este conmutador, podemos seleccionar el tipo de señal de entrada para el canal 1: AC para la corriente alterna, CC para la corriente continua y GND para la señal de entrada desconectada (entrada conectada a masa; aquí podemos situar la señal de referencia con el mando de desplazamiento vertical (1) donde deseemos).
4. **Atenuador vertical (CH2):** Permite atenuar la señal de entrada del canal 2 y seleccionar la constante de medida en voltios/división.
5. **Selector AC-GND-DC de canal 2:** Con este conmutador podemos seleccionar el tipo de señal de entrada para el canal 2: AC para la corriente alterna, CC para la corriente continua y GND para la señal de entrada desconectada (entrada conectada a masa; aquí podemos situar la señal de referencia con el mando de desplazamiento vertical (7) donde deseemos).
6. **Entrada vertical (CH1):** Entrada para la señal del canal 1.
7. **Desplazamiento vertical de canal 2:** Permite desplazar la señal del canal 2 en sentido vertical.
8. **Inversor de la señal:** Con este conmutador invertimos la señal del canal 1 o 2 en los modos de funcionamiento CH1 o CH2 (9). Si pulsamos CH1 y CH2 simultáneamente, obtenemos la diferencia de las dos señales.
9. **Modos de funcionamiento:** Permite seleccionar la señal a visualizar en la pantalla. CH1 para el canal 1; CH2 para el canal 2; CH1 y CH2 simultáneamente para sumar ambas señales; ALT para visualizar las dos señales a la vez; CHOP para conseguir que el barrido se realice más despacio.
10. **Selector de la fuente de barrido:** Permite seleccionar la fuente de disparo: v.mode (propia); ch1 (señal del canal 1); ch2 (señal del canal 2); line (señal exterior de la red); ext (señal exterior).
11. **Nivel (comienzo del trazo):** Mediante este control se puede seleccionar el punto de la señal donde comience el trazo.
12. **Modos de disparo:** Permite seleccionar el modo de disparo: Auto (los impulsos de barrido se producen internamente); Norm (mientras no conectemos una señal a la entrada, no aparecerá ninguna imagen en la pantalla); x/y (el canal 1 produce la deflexión vertical, y el canal 2 la deflexión horizontal).
13. **Desplazamiento horizontal:** Con este control podemos variar la posición horizontal del trazo.
14. **Entrada vertical (CH2):** Entrada para la señal del canal 2.
15. **Base de tiempos:** Selecciona la constante del eje de tiempos.
16. **Brillo:** Da más o menos brillo al trazo de la señal en pantalla.
17. **Foco:** Enfocamos el trazo de la señal en pantalla.
18. **Interruptor de encendido.**

En la actualidad se están imponiendo los osciloscopios digitales debido a las ventajas que presentan frente a los analógicos. En los digitales tendremos más opciones a la hora de analizar una señal, que normalmente aparecerán mediante menús en pantalla.

9.7.1. Manejo del osciloscopio

Como medida de precaución general, antes de conectar un osciloscopio a la red eléctrica hay que asegurarse de que éste esté debidamente conectado a tierra. Además ajustaremos el brillo en un punto intermedio para evitar dañar la pantalla con una intensidad del haz electrónico demasiado elevada.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Una vez que se ha puesto en marcha el osciloscopio con el interruptor de encendido, seleccionaremos el conmutador de entrada de señal vertical en la posición GND y, con los controles de posición (POSITION), desplazaremos el trazo hasta el centro de la pantalla. Seguidamente se ajustan la intensidad y el foco del trazo en la pantalla.

Tanto para la medida de las señales de C.A. como de C.C. lo primero que haremos será introducir la sonda en el conector correspondiente (INPUT). Si deseamos medir tensiones de entrada elevada, tendremos que utilizar sondas especiales atenuadoras con el fin de rebajar estas tensiones hasta un nivel aceptable para la entrada del osciloscopio.

Para la medida de las corrientes alternas, colocaremos el selector de entrada en AC. Además nos aseguraremos de que la fuente de barrido (SOURCE) del circuito de disparo (TRIGGER) seleccionada sea correcta. Seguidamente situaremos los mandos del atenuador vertical (volts/div) y de la base de tiempos (TIMEBASE) hasta conseguir encajar en la pantalla un ciclo completo de la señal (al manejar estos dos mandos, se debe observar que el mando de ajuste fino se encuentra en posición desconectada CAL).

Para la medida de las corrientes continuas, colocaremos el selector de entrada en DC.

Actividad resuelta 9.3

Al realizar una medida de una tensión alterna con un osciloscopio, aparece en la pantalla la imagen que se muestra en la Figura 9.17. Si los grados de desviación seleccionados fuesen: atenuador vertical (2 V/div), base de tiempos (5 ms/div), averigua el valor máximo y eficaz de la tensión, así como el período y la frecuencia.

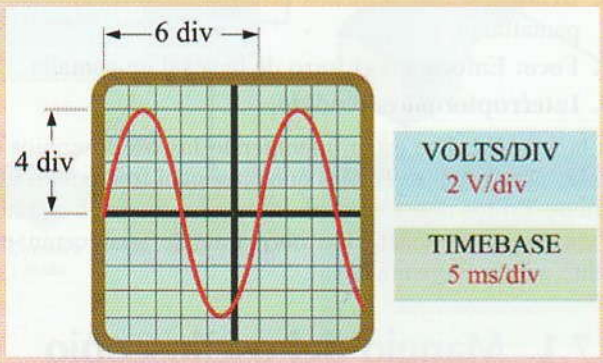


Figura 9.17.

Solución:

$$V_{máx} = 4 \text{ div} \cdot 2 \text{ V/div} = 8 \text{ V}$$

$$T = 6 \text{ div} \cdot 5 \text{ ms/div} = 30 \text{ ms} = 0{,}03 \text{ s}$$

$$V_{eficaz} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}} = \frac{8}{\sqrt{2}} = 5{,}66 \text{ V}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}03} = 33{,}33 \text{ Hz}$$

Actividad resuelta 9.4

Al realizar una medida con un osciloscopio de una tensión continua, aparece en la pantalla la imagen que se muestra en la Figura 9.18. Si los grados de desviación seleccionados fuesen: atenuador vertical (10 V/div), base de tiempos (0,1 ms/div), averigua el valor medio de la tensión continua.

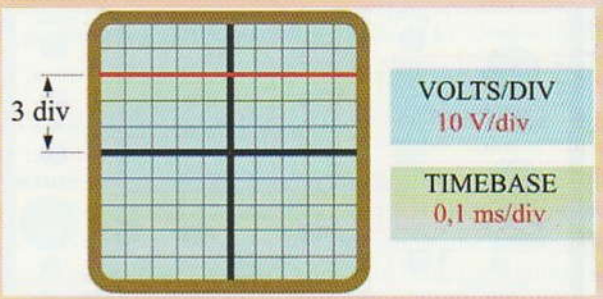


Figura 9.18.

Solución: $V_{CC} = 3 \text{ div} \cdot 10 \text{ V/div} = 30 \text{ V}$

9.7.2. El osciloscopio digital

Los osciloscopios analógicos están siendo sustituidos poco a poco por los osciloscopios digitales, como consecuencia de las mejores prestaciones de estos últimos.

Los osciloscopios analógicos presentan alguna limitación en su funcionamiento, como por ejemplo:

- Las señales a medir deben ser periódicas (la señal tiene que variar siempre de la misma forma).
- Una señal de alta frecuencia tiende a reducir el brillo de la pantalla, ya que las rápidas variaciones de la señal reducen el tiempo de refresco de la pantalla.
- Una señal de baja frecuencia no consigue formar un trazo en la pantalla, observándose sólo un punto en movimiento.
- Si se producen fenómenos transitorios (alteraciones bruscas de la señal en un tiempo muy corto), éstos no aparecen en la señal de la pantalla a no ser que sean repetitivos.

El osciloscopio digital toma la señal analógica presente en la sonda y muestrea la tensión a medir, convirtiéndola en

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

una señal digital mediante un conversor analógico-digital (ADC). De esta forma el osciloscopio trabaja internamente con señales digitales que luego deberá reconstruir para poder ser presentada en su pantalla (veáse Figura 9.19).

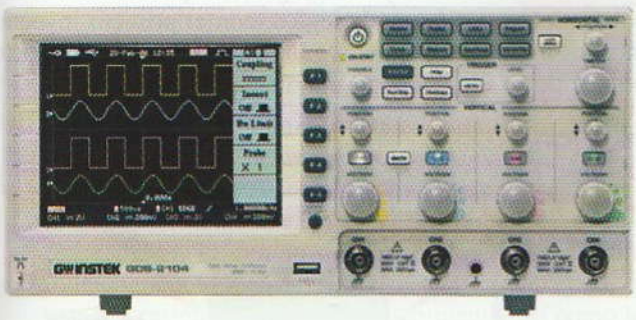


Figura 9.19. Osciloscopio digital comercial de cuatro canales (GDS).

El procedimiento de medida de los osciloscopios digitales es básicamente igual a los analógicos, pero con mayores posibilidades y facilidad para la medida, como por ejemplo:

- Visualizar transitorios de corta duración.
- Memorizar las señales para su posterior análisis en la pantalla del osciloscopio.
- Transferencia de los datos memorizados a un ordenador.
- Visualización de varias señales a la vez.
- Medida automática de diferentes parámetros de la señal: valores máximo y mínimo, verdadero valor eficaz, frecuencia, etc.

9.8 Generador de funciones

Se puede decir que un generador de señales es un dispositivo elaborado para producir señales eléctricas de unas determinadas características, las cuales podemos aplicar a un circuito en el que se desean analizar los efectos causados por las mismas.

Los generadores de señal se pueden utilizar como excitadores de un determinado circuito electrónico, con el fin de imitar una determinada condición de entrada que suela darse habitualmente en él y así poder realizar un análisis total de la respuesta de dicho circuito.

Los generadores de señales son instrumentos muy útiles en los laboratorios, ya que se pueden usar en cualquier tipo de prueba y medida, como por ejemplo:

- Análisis de circuitos electrónicos.
- Verificación de amplificadores (respuesta de frecuencia, distorsión, etc.).
- Ajuste de etapas de amplificadores, así como receptores y emisoras de radiofrecuencia.

Fundamentalmente, los generadores de señal se elaboran a partir de un circuito oscilador que tiene la propiedad de producir una determinada forma de onda, cuya frecuencia se regula mediante un mando situado en su panel de control. Los generadores de señal también incorporan un dispositivo de medición de la frecuencia, de tal forma, que al manipular el mando de selección, podamos saber la frecuencia de la señal obtenida en la salida.

Los tipos de onda que puede proporcionar un generador de señal pueden ser variados: senoidal, triangular, cuadrada y de impulsos. Entre todas ellas, la que cuenta con más aplicaciones es indudablemente, la *senoidal*, sobre todo, en equipos de audio. Al aparato que es capaz de generar tanto las señales senoidales como las triangulares y cuadrada se lo conoce como generador de funciones.

En la Figura 9.20 se muestra el aspecto de un generador de funciones genérico con sus partes más significativas.

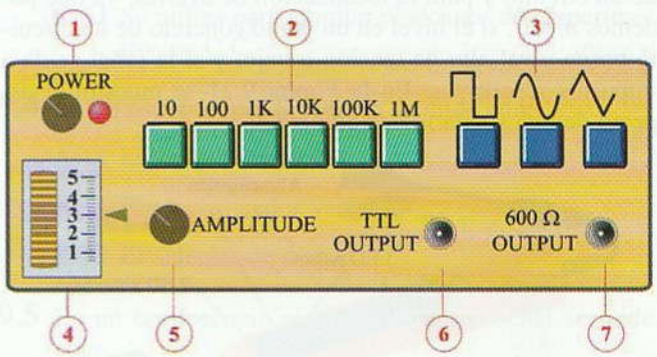


Figura 9.20. Generador de señales de laboratorio.

1. **Interruptor de encendido.**
2. **Selector de banda de frecuencia:** Permite seleccionar el poder multiplicador del selector de frecuencias.
3. **Selector de la forma de onda:** Podemos seleccionar el tipo de onda a generar: cuadrada, senoidal o triangular.
4. **Selector de frecuencias:** Seleccionamos la frecuencia de la señal generada teniendo en cuenta el margen de frecuencias seleccionado en el «selector de banda de frecuencias» (la frecuencia generada será el producto de la frecuencia seleccionada por el poder multiplicador seleccionado en el «selector de banda de frecuencia»).
5. **Control de la amplitud:** Aumentamos o disminuimos la tensión de salida de la señal generada.
6. **Terminal para señales TTL:** Aquí se refleja una señal de salida en forma de impulsos TTL.
7. **Terminal de salida:** Aquí se registra la señal de salida generada.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

El funcionamiento del generador de funciones es muy simple. Primero se selecciona la forma de onda y la banda de frecuencias, seguidamente se ajusta la frecuencia de salida que deseemos aplicar a la señal de salida y por último la amplitud.

9.9 Instrumentación digital

Para el análisis y reparación de circuitos digitales, a parte del polímetro, el osciloscopio y el generador de funciones se utiliza una instrumentación específica, nos referimos a:

- La sonda lógica.
- El inyector lógico.
- El analizador lógico.

9.9.1. La sonda lógica

La sonda lógica es un instrumento que nos permite detectar el nivel lógico en cualquier punto de un circuito digital. Es muy útil para la verificación del funcionamiento correcto de un circuito y para la localización de averías, ya que podemos medir, si el nivel en un punto concreto de un circuito posee nivel alto de tensión o bajo, y si la señal se da a impulsos repetitivos. En la Figura 9.21 se muestra el aspecto de una sonda lógica comercial.

Figura 9.21. Sonda lógica para detectar el nivel lógico de un circuito digital.

Para medir el estado lógico de una parte de un circuito basta con ponerla en contacto la punta conductora de la sonda. El nivel lógico se obtiene mediante unos LEDS de diferente color y un avisador acústico con un tono especial para cada caso. Así, por ejemplo, lo más común es encontrarse con:

- LED rojo = nivel alto.
- LED verde = nivel bajo.
- LED amarillo = impulsos repetitivos.

Las sondas lógicas nos permiten ser utilizadas tanto para el diagnóstico de circuitos digitales con tecnología TTL o con tecnología CMOS, para lo cual habrá que situar el selector correspondiente en función del circuito a analizar.

9.9.2. El inyector o pulsador lógico

El inyector lógico es un instrumento que sirve para generar una señal cuadrada y ser aplicada a cualquier punto de un circuito digital. El inyector lógico se puede utilizar en combinación con la sonda lógica; con el primero inyectamos los impulsos y con el segundo comprobamos el efecto producido en el circuito digital (Figura 9.22).

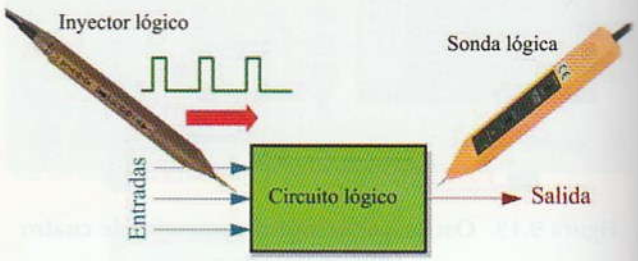


Figura 9.22. Utilización combinada de inyector y sonda lógica para el diagnóstico de un circuito digital.

9.9.3. El analizador lógico

El analizador lógico permite visualizar a la vez en una pantalla varias señales digitales con el fin de poder analizarlas y realizar así un diagnóstico preciso del funcionamiento de un circuito digital. Este dispositivo posee la capacidad de almacenar una secuencia de estados lógicos a partir de un momento determinado para su posterior análisis (Figura 9.23).

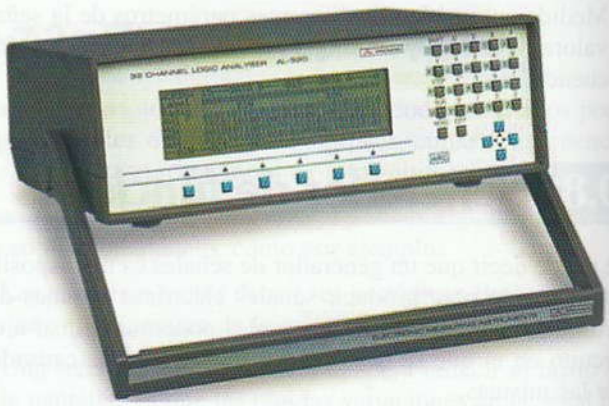


Figura 9.23. Analizador lógico Promax de 32 canales y 25 MHz de frecuencia de adquisición de datos.

A diferencia del osciloscopio, el analizador lógico no mide los datos analógicos, sino que solamente detecta los dos niveles lógicos: nivel alto de tensión = «1» y nivel bajo = «0», presentando la información en la pantalla de forma similar a los cronogramas estudiados en los circuitos secuenciales. Además, estos instrumentos tienen la capacidad para registrar señales digitales de alta frecuencia.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

9.1 Identificación de aparatos de medida. Consigue diferentes modelos de aparatos de medida, observa todas las indicaciones que aparecen en pantalla o en sus instrucciones de manejo y con ellas indica: la magnitud a medir, el campo de medición, la posición de funcionamiento, el sistema de medición empleado, el tipo de corriente, la clase del instrumento, así como la constante de la escala.

9.2 Manejo del polímetro. Consigue un polímetro comercial, analiza sus características y sus diferentes campos de medida, comprobando su funcionamiento en la verificación de un circuito eléctrico. Ahora selecciona la posición de la medida de las resistencias, mide la resistencia eléctrica de diferentes dispositivos eléctricos. No te olvides que para la medida de las resistencias eléctricas, éstas tienen que estar separadas de la alimentación eléctrica.

9.3 Manejo del osciloscopio. Consigue un osciloscopio, analiza sus características y con la ayuda de un generador de funciones, comprueba los valores de las magnitudes asociadas a las señales senoidales de diferentes frecuencias.

Al finalizar cada una de estas actividades, deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para su adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

9.4 Manejo de instrumentación digital. Una vez estudiadas las primeras unidades didácticas relativas a la Electrónica digital, consigue una sonda lógica, un inyector lógico y un analizador lógico, analiza sus características y comprueba con ellos el funcionamiento de un circuito lógico secuencial.

AUTOEVALUACIÓN

9.1 Para comprobar el error que comete un amperímetro se toma una medida de 350 mA y luego se comprueba con un amperímetro de gran precisión la misma medida, dando como resultado 335 mA. Determina el error absoluto y relativo cometido por el amperímetro.

9.2 El shunt

A ❑ Es una resistencia para ampliar el alcance de un voltímetro.

B ❑ Es una resistencia para ampliar el alcance de un amperímetro.

C ❑ Se conecta en serie con el amperímetro.

9.3 El transformador de intensidad:

A ❑ Se utiliza para ampliar el alcance de voltímetros en C.A.

B ❑ Se utiliza para ampliar el alcance de amperímetros en C.A.

C ❑ Se utiliza para ampliar el alcance de amperímetros en C.C.

9.4 En un osciloscopio la tensión se mide con:

A ❑ La base de tiempos.

B ❑ El ampliflicador vertical.

C ❑ El selector de disparo.

9.5 En un osciloscopio el período de una señal se mide con:

A ❑ La base de tiempos.

B ❑ El ampliflicador vertical.

C ❑ El selector de disparo.

9.6 En un osciloscopio si el selector está en GND:

A ❑ Se muestra una señal de corriente alterna.

B ❑ Se muestra una señal de corriente continua.

C ❑ Se muestra una señal de referencia a masa.

9.7 Indica cuál de las siguientes afirmaciones sobre un osciloscopio digital es falsa:

A ❑ No es posible registrar fenómenos transitorios.

B ❑ Puede memorizar los datos obtenidos.

C ❑ Puede representar sin problemas señales de baja frecuencia.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

9.8 Indica cuál de las siguientes afirmaciones sobre un osciloscopio analógica es falsa:

A ❑ Las señales de alta frecuencia reducen el brillo de la señal en pantalla.

B ❑ Puede medir de forma automática el valor máximo y el eficaz.

C ❑ Representa con problemas señales de baja frecuencia.

9.9 Indica cuál de las siguientes afirmaciones sobre una sonda lógica es falsa:

A ❑ Sirve para inyectar un tren de impulsos digitales a un circuito.

B ❑ Detecta el nivel lógico en un punto de un circuito.

C ❑ Posee un avisador acústico.

9.10 Indica cuál de las siguientes afirmaciones sobre un inyector lógico es falsa:

A ❑ Sirve para inyectar un tren de impulsos digitales a un circuito.

B ❑ Detecta el nivel lógico en un punto de un circuito.

C ❑ Posee un pulsador para la inyección de señales.

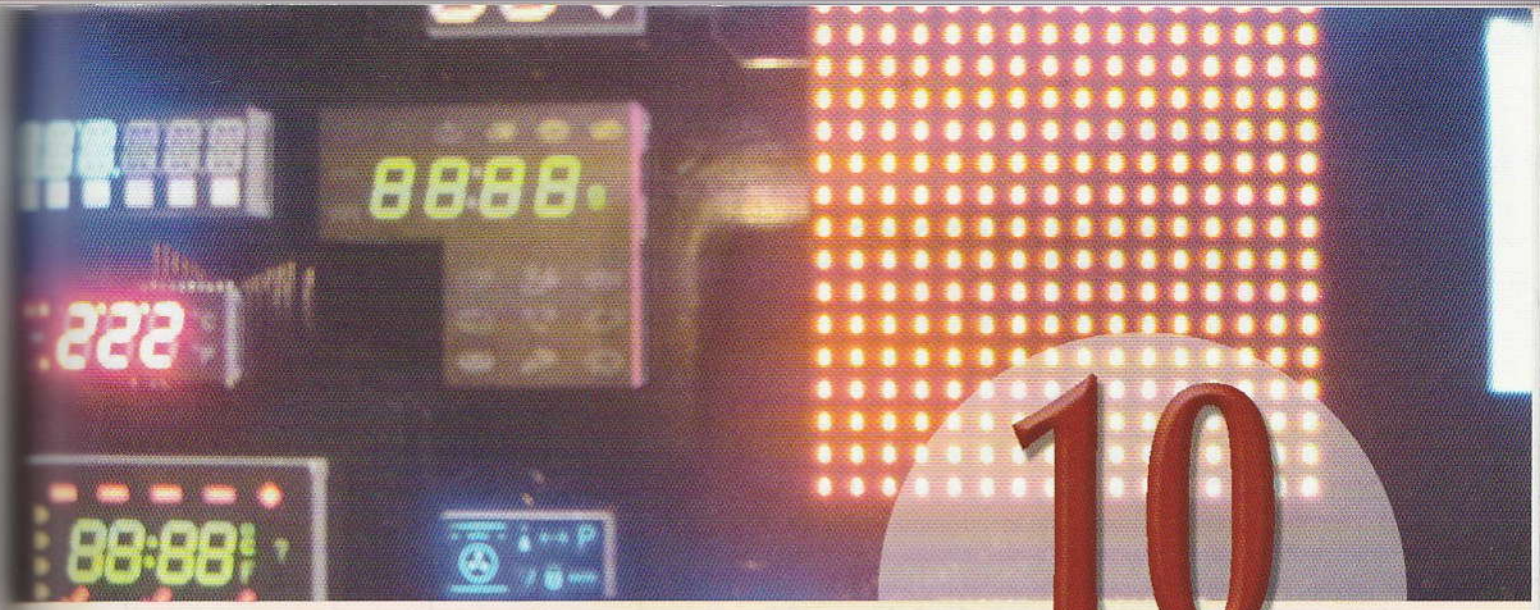
AMPLIACIÓN

9.1 Selecciona algunos de los ejercicios planteados en los ***Ejercicios de evaluación 9*** que se incluyen en www.paraninfo.es y encuentra su solución.

9.2 Consulta en www.paraninfo.es los documentos: ***Manual del usuario del polímetro digital (FluKe), Características y ventajas osciloscopios digitales (Tektronix), Técnicas de medida con el osciloscopio (Hameg), Ejemplo de Manual del usuario de un osciloscopio analógico (Hameg), Ejemplo de Manual del usuario de un osciloscopio digital (Tektronix), Manual técnico del analizador lógico (Tektronix).***

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



10

Semiconductores. El diodo

El sector electrónico ha conseguido hoy en día unas cotas de importancia en el sector productivo y de bienes de consumo que parecían inimaginables hace unos años. La electrónica y los componentes electrónicos comienzan su andadura a finales del siglo XIX con el desarrollo del diodo y del triodo de vacío. Con estos elementos ya era posible la amplificación de señales y multitud de aplicaciones. Con la invención a finales de 1940 del transistor bipolar a base de componentes de estado sólido, se produjo una verdadera revolución en el sector electrónico. El siguiente paso fue la aparición en 1959 del primer circuito integrado. Desde ese momento, las posibilidades de miniaturización de los circuitos gracias al aumento de las posibilidades en la densidad de integración han crecido exponencialmente, dando lugar a un nuevo concepto: la microelectrónica.

Se puede decir que con los semiconductores se comienza el estudio propio de la electrónica. Con el uso de los semiconductores es posible la elaboración de diodos, transistores, tiristores y circuitos integrados en general.

En esta unidad didáctica vamos a estudiar los diodos para posteriormente aplicarlos en circuitos de rectificación (circuitos que convierten la corriente alterna en continua).

Contenido

10.1. Los semiconductores
10.2. El diodo como semiconductor
10.3. Características atómicas del silicio
10.4. El diodo de unión
10.5. Dispositivos optoelectrónicos
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los diodos.
- Describir las curvas características más representativas de los diodos, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- Interpretar los parámetros fundamentales que aparecen en las hojas técnicas de los fabricantes de diodos.
- Analizar la tipología y características funcionales de los dispositivos optoelectrónicos.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

10.1 Los semiconductores

Los semiconductores han revolucionado el mundo de la electrónica. Con ellos han aparecido los diodos, los transistores, los tiristores y los demás componentes electrónicos construidos gracias a los semiconductores que han sustituido a las válvulas electrónicas. Por otro lado, con la aparición de los circuitos integrados, que suplen la función de grandes cantidades de diodos, transistores, resistencias, condensadores y cualquier tipo de componente electrónico, se ha dado el gran paso hacia el futuro de la electrónica. La ventaja que poseen los semiconductores es que son de reducido tamaño, pequeño consumo y bajo precio. En la Figura 10.1 se muestran los símbolos eléctricos de los semiconductores más comunes y en la Figura 10.2 el aspecto de los mismos.

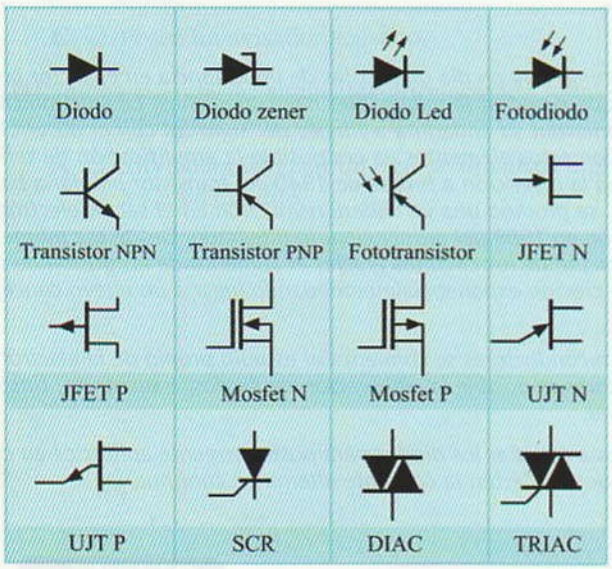


Figura 10.1. Símbolos eléctricos de los semiconductores.

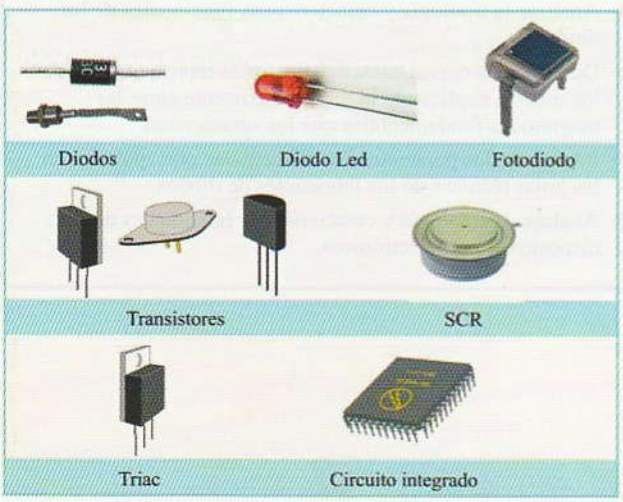


Figura 10.2. Aspecto de los semiconductores.

10.2 El diodo como semiconductor

El diodo es un elemento semiconductor que sólo permite la circulación de la corriente en un sentido único (Figura 10.3).

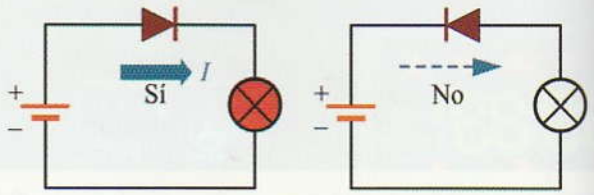


Figura 10.3.

Su aplicación es especialmente interesante en aquellos dispositivos en que sea necesaria esta cualidad, como, por ejemplo, en los rectificadores, que son capaces de convertir la C.A. en C.C.

Antes de pasar a estudiar los diodos de unión, conviene tener una idea muy clara de lo que es un semiconductor.

Existen ciertos cuerpos como, por ejemplo, el selenio, el germanio y el silicio que, en condiciones normales, son aislantes, pero con ciertas modificaciones de su organización molecular se pueden convertir en conductores. Esto es debido a que su estructura cristalina no dispone de electrones libres capaces de establecer una corriente eléctrica; sin embargo, los electrones de sus últimas órbitas pueden ser liberados artificialmente, por lo que se convierten en cuerpos conductores. El procedimiento más habitual para conseguirlo consiste en introducir, en el interior de estos materiales, sustancias con una estructura atómica determinada.

Actividad experimental 10.1

Consigue un diodo y conéctalo intercalado en el circuito de una pila y una lamparita (Figura 10.4). Si conectas el cátodo del diodo (terminal negativo indicado por

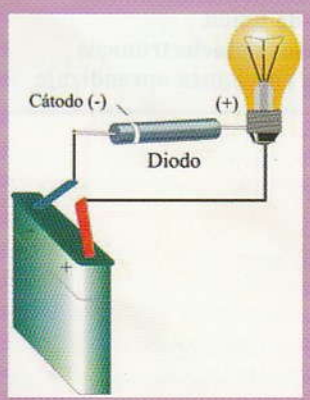


Figura 10.4.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

una raya en el componente) en el polo negativo de la pila, observarás que dicha lamparita se enciende. Sin embargo, si inviertes las conexiones del diodo, la lamparita no se encenderá.

En definitiva, el diodo actúa como un interruptor que estará cerrado en caso de estar bien polarizado y abierto cuando la polarización esté invertida.

Esta propiedad es muy interesante y está motivada por la estructura interna del diodo. En efecto, este componente está constituido por la unión de dos cristales semiconductores, uno de tipo P y otro de tipo N (Figura 10.5).

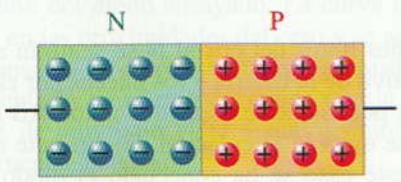


Figura 10.5. Unión de dos cristales de tipo P y N.

Estos cristales son de silicio o de germanio con la adición de algún otro elemento que les confiere una cierta polaridad ya sea P (exceso de cargas positivas) o N (exceso de negativas).

¿Cómo se forman estos cristales?

Estudiemos el caso del silicio como cuerpo semiconductor, por ser el más utilizado.

10.3 Características atómicas del silicio

Es un cuerpo cristalino cuyas moléculas tienen formas geométricas regulares. Por otro lado, posee 4 electrones de valencia, es decir, que en su órbita exterior sólo existen cuatro electrones (Figura 10.6). Como se sabe, todo cuerpo precisa de 8 electrones de valencia para que mantenga una estabilidad normal. El silicio es un cuerpo estable con sólo 4 electrones de valencia, ya que se complementa con cuatro electrones de los átomos vecinos (enlace covalente) y así suma los 8 electrones precisos para su estabilidad.

En estas condiciones, el átomo de silicio es completamente aislante, ya que no existen en su seno electrones libres capaces de establecer una corriente eléctrica.

Silicio tipo N: Existen elementos, como el antimonio, el arsénico, etc., que poseen 5 electrones de valencia. Si unimos uno de estos elementos con el silicio, se producirán enlaces covalentes incompletos, ya que uno de los electrones de estos elementos quedará libre por estar las órbitas

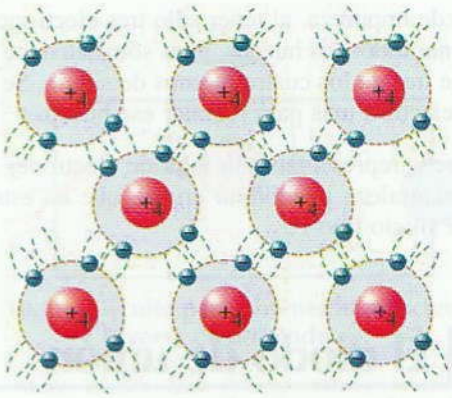


Figura 10.6. Enlaces covalentes en el silicio.

completas. El resultado de la combinación del silicio con la impureza de antimonio es un cristal denominado silicio tipo N, ya que existen cargas negativas libres (Figura 10.7).

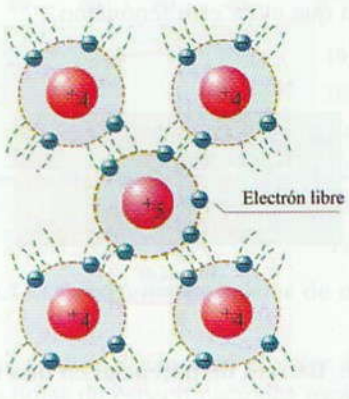


Figura 10.7. Enlaces covalentes incompletos de un cristal de silicio tipo N.

Silicio tipo P: De la misma forma que en el caso anterior, si al silicio en estado puro se le introducen impurezas que, en vez de tener cinco electrones de valencia, sólo dispongan de tres, como el indio, el aluminio, el galio, el boro, etc., el enlace covalente será, otra vez, incompleto (Figura 10.8).

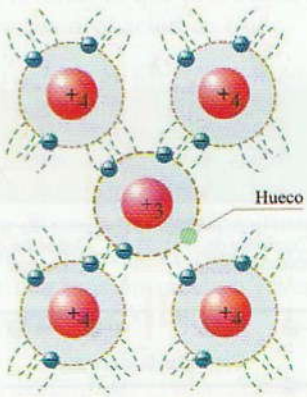


Figura 10.8. Enlaces covalentes incompletos en un cristal P.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

El átomo de impureza, al tener sólo tres electrones, no llega a rellenar todos los huecos, pues sólo satisface las necesidades de tres de los cuatro átomos de silicio. Se necesita, pues, un electrón más para rellenar ese hueco.

Estos huecos representan una falta de electrones y producen una naturaleza positiva al cristal, que en este caso se denomina silicio tipo P.

10.4 El diodo de unión

El diodo de unión se forma al juntar un cristal tipo P con otro tipo N (Figura 10.9). Da la impresión de que, al juntar estos dos cristales de cargas opuestas, en la unión AB se producirá una neutralización de cargas, pero no es así, ya que en dicha unión aparece una pequeña barrera por efecto de la repulsión que evita este fenómeno.

Figura 10.9. Barrera de potencial en una unión PN.

Ahora bien, si conectamos una batería al diodo (Figura 10.10), de tal forma que el polo positivo de éste coincida con el cristal tipo P y el negativo con el cristal tipo N, las cargas negativas serán repelidas hacia la superficie de la unión con gran fuerza y vencerán de este modo la barrera AB. Por lo tanto, se producirá una corriente eléctrica I_F a través del diodo, neutralizándose los electrones con los huecos.

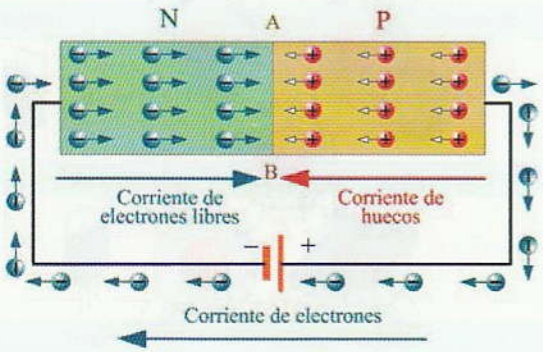


Figura 10.10. Polarización directa de un diodo de unión.

Veamos ahora qué pasaría si conectásemos la batería en sentido contrario (Figura 10.11).

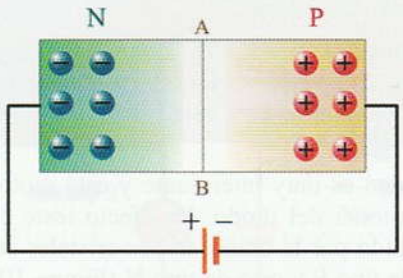


Figura 10.11. Polarización inversa del diodo de unión.

Los electrones libres del cristal N se sentirán atraídos por el polo positivo de la batería y los huecos por el polo negativo de ésta, por lo que se crea en la unión AB una especie de vacío que evita la circulación de corriente a través del diodo. En este caso se ha conectado el diodo en sentido inverso. A pesar de ello siempre existe una pequeña corriente de fuga que recibe el nombre de *corriente inversa del diodo* (I_R).

Para que el diodo conduzca polarizado en sentido directo, necesita ser sometido a una tensión mínima de polarización, que en el caso del germanio es de 0,2 V y de 0,6 V para el silicio.

Las características de los diodos semiconductores varían grandemente con la temperatura. De tal forma que, cuanto mayor sea la temperatura de la unión, mayor será el número de electrones libres y, por tanto, aumentará la corriente de conducción. En el germanio estas variaciones son excesivas, por encima de los 75 °C se hace difícil su utilización, mientras que el silicio puede emplearse hasta los 200 °C aproximadamente. En la actualidad, la gran mayoría de semiconductores es de silicio.

10.4.1. Características en polarización directa de un diodo

Obtener las características de polarización de un diodo significa determinar la relación existente entre los diferentes valores de la tensión de polarización (V_F) y la corriente directa (I_F).

Para obtener experimentalmente esta relación habría que realizar el ensayo que se muestra en la Figura 10.12. En ella, la lectura de V_F indica la tensión de polarización directa en voltios y la lectura de la corriente directa I_F.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

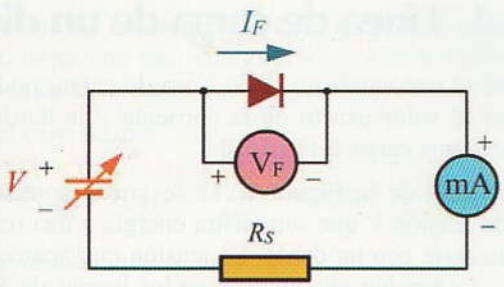


Figura 10.12. Circuito para obtener la curva de polarización directa de un diodo.

En la Figura 10.13 se puede apreciar la curva característica de polarización del diodo ensayado. La curva tiene forma exponencial en las proximidades del cero y se acerca al valor de la intensidad de corriente máxima admisible a medida que aumenta la tensión. Esto indica que la resistencia del diodo es de muy bajo valor y que disminuye rápidamente al aumentar la tensión.

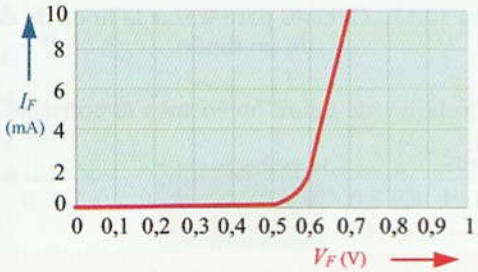


Figura 10.13. Curva de polarización directa de un diodo.

Cuando polarizamos directamente un diodo, éste no comienza a conducir de una forma apreciable hasta que le aplicamos la mínima diferencia de potencial de barrera, conocida por el nombre de tensión umbral. En el caso del germanio esta tensión es de 0,2 V y en el del silicio 0,6 V. Por debajo de esta tensión, la corriente es muy pequeña y por encima aumenta considerablemente.

10.4.2. Características en polarización inversa de un diodo

Para obtener la curva característica inversa bastará con invertir la corriente del diodo, de tal forma que el cristal N esté conectado al positivo de la pila y el P al negativo (Figura 10.14).

Ya se dijo anteriormente que cuando el diodo queda sometido a una tensión inversa V_R, aparece una pequeña corriente de fuga I_R, a la cual denominábamos corriente inversa. Esta corriente es del orden de unos µA o nA, tal como se puede apreciar en la curva de la Figura 10.15 correspondiente a la característica inversa del diodo.

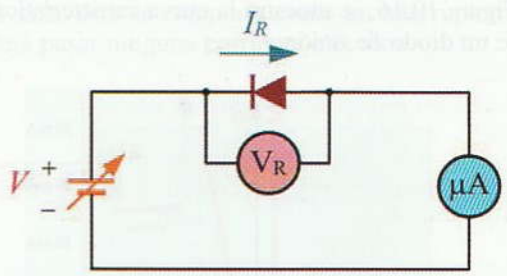


Figura 10.14. Circuito para obtener la característica inversa de un diodo.

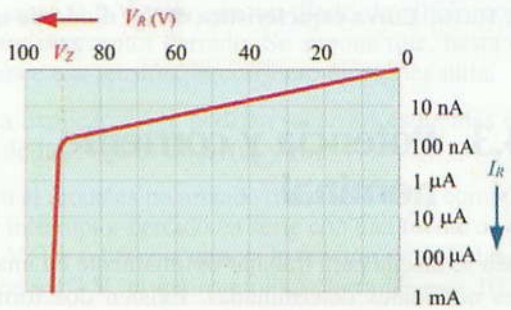


Figura 10.15. Característica inversa de un diodo.

Los fabricantes de diodos expresan el valor de la corriente inversa en sus hojas de especificaciones técnicas. Así, por ejemplo, la serie de diodos con la referencia 1N4001 a 1N4007 establece una corriente inversa de 10 µA cuando son polarizados inversamente.

Observa que, según se aumenta la tensión inversa, también lo hace la corriente, hasta que se llega a un valor V_Z, llamado tensión de ruptura del diodo. En este momento aparece un efecto de avalancha y aumenta bruscamente la intensidad de corriente inversa, lo que provoca la destrucción del diodo por la excesiva disipación de calor.

Para que esto no ocurra, es necesario diseñar las condiciones de trabajo del diodo con una tensión inversa siempre menor a su tensión de ruptura.

Los fabricantes de diodos especifican los valores de la ***tensión inversa pico*** en sus hojas de especificaciones técnicas. Así, por ejemplo, mientras el diodo con la referencia 1N4001 soporta una tensión máxima inversa de 50 V, el 1N4007 llega a soportar 1.000 V.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de la familia de diodos 1N4001-1N4007.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la Figura 10.16, se muestra la curva característica completa de un diodo de unión.

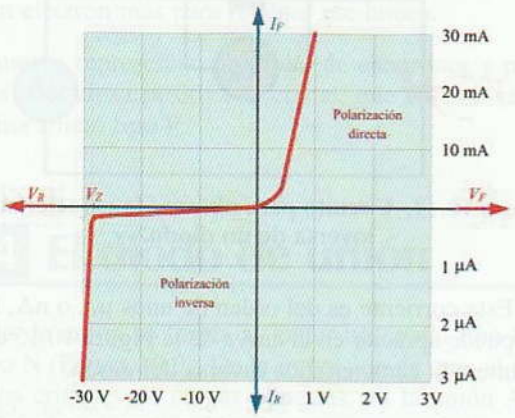


Figura 10.16. Curva característica de un diodo de unión.

10.4.3. Potencia y corriente nominal

Un diodo se diseña para trabajar óptimamente en unas condiciones nominales determinadas. Existen dos formas de provocar la destrucción de un diodo:

- Exceder la tensión inversa de ruptura.
- Exceder la potencia máxima nominal.

Como ocurría con las resistencias, los diodos poseen una cierta capacidad de disipar el calor que se produce en su unión. Este calor depende de la potencia a la que trabaja el diodo, que depende, a su vez, del producto de la corriente por la tensión de éste.

Si la potencia que se produce en el diodo es superior a su capacidad de disipación, éste aumentará excesivamente su temperatura y acabará deteriorándose.

Existen algunos fabricantes que especifican la potencia nominal de sus diodos en las hojas de información técnica. No obstante, lo normal es que en estas informaciones únicamente aparezca la corriente máxima de polarización directa. Bastará con no sobrepasar este valor para que en ningún caso se supere la potencia máxima nominal.

Así, por ejemplo, la gama de diodos con la referencia 1N4001 a 1N4007 permite una corriente directa nominal de 1 A, mientras que el diodo 1N418 permite una corriente directa de 150 mA y una disipación de potencia a $T_{amb} = 25\,^{\circ}C$ de 500 mW.

10.4.4. Línea de carga de un diodo

Mediante el conocimiento de la línea de carga, podremos encontrar el valor exacto de la corriente y la tensión del diodo para una carga determinada.

En el circuito de la Figura 10.17 se puede apreciar una fuente de tensión V que suministra energía a una resistencia R_S en serie con un diodo. La tensión que aparecerá en él es V_F. La tensión que aparece en los bornes de R_S será igual a la tensión total V menos la caída de tensión V_F que provoca el diodo.

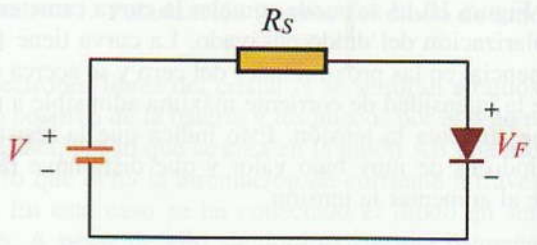


Figura 10.17. Circuito para trazar la línea de carga de un diodo.

Aplicando la ley de Ohm, obtenemos la corriente del circuito:

$$I_F = \frac{V - V_F}{R_S}$$

Esta corriente se puede representar mediante una recta que nos va ayudar a determinar el punto de trabajo del diodo para unos valores determinados de tensión V y resistencia R_S.

Actividad resuelta 10.1

El valor de la corriente en el circuito de la Figura 10.18 es:

$$I_F = \frac{1{,}2 - V_F}{175}$$

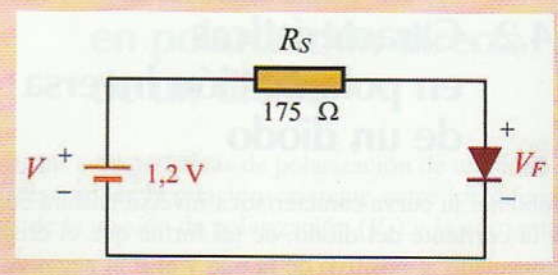


Figura 10.18.

Observa cómo aparece una relación lineal entre la corriente y la tensión.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Para realizar una representación gráfica de esta ecuación, basta con dar valores a V_F y obtener diferentes puntos de la línea.

En el caso de que

$$V_F = 0 \text{ V}, I_F = \frac{1{,}2 - 0}{175} = 0{,}007 \text{ A} = 7 \text{ mA}$$

En el caso de que

$$V_F = 1{,}2 \text{ V}, I_F = \frac{1{,}2 - 1{,}2}{175} = 0$$

En el caso de que la curva característica del diodo sea la que se representa en la Figura 10.19, la línea de carga será una recta que corte los puntos de 1,2 V y 7 mA. El punto de intersección de estas dos curvas nos indica los valores de la tensión y corriente del diodo para una tensión de 1,2 V y una resistencia limitadora de 175 Ω.

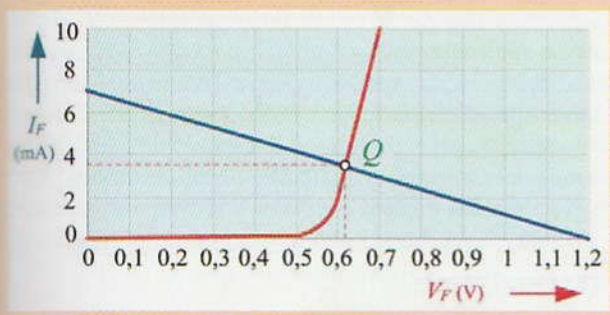


Figura 10.19. **Recta de carga del diodo.**

En nuestro ejemplo se obtiene una corriente de 3,6 mA y una tensión de polarización directa en el diodo de 0,62 V. A este punto se lo denomina punto de funcionamiento del diodo.

10.4.5. Característica aproximada de un diodo

Al estudiar las resistencias y condensadores, hemos tenido oportunidad de comprobar que los valores de la resistencia o la capacidad de estos dispositivos poseen un cierto margen de tolerancia. Lo mismo ocurre con los valores característicos de un diodo, de los cuales no se puede afirmar que sean exactos. Por esta razón, se puede encontrar una curva característica aproximada de trabajo de un diodo sin cometer, por nuestra parte, grandes errores. Además, este hecho simplifica notablemente la resolución de los circuitos con diodos.

En la Figura 10.20, se muestra dicha curva aproximada. Se supone que cuando el diodo está polarizado con una tensión inversa, éste se comporta como un interruptor abierto y no deja pasar ninguna corriente eléctrica.

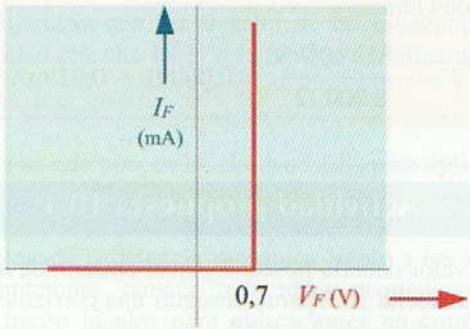


Figura 10.20. **Característica aproximada de un diodo.**

Por otro lado, se considera que se necesitan aproximadamente unos 0,7 V para que un diodo de silicio conduzca como un interruptor cerrado. Se supone que, hasta que no se alcance esa tensión, la corriente directa es nula.

De esta explicación se podrían sacar los esquemas equivalentes de las Figuras 10.21(a) y (b).

Cuando el diodo es polarizado directamente se comporta como un interruptor cerrado en serie con una fuente de tensión de 0,7 V. De tal forma que, si la tensión de polarización es superior a 0,7 V, el interruptor se cierra [Figura 10.21(a)].

Si se invierte la tensión de polarización del diodo, éste se comporta como un interruptor abierto [Figura 10.21(b)].

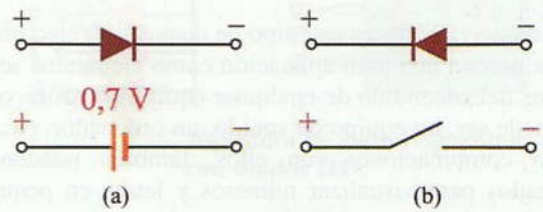


Figura 10.21. **(a) Diodo polarizado directamente. (b) Diodo polarizado inversamente.**

Actividad resuelta 10.2

¿Cuál será la corriente directa del diodo del circuito de la Figura 10.22?

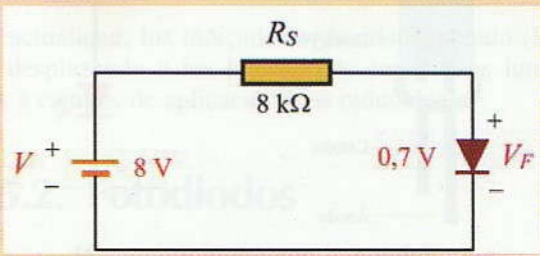


Figura 10.22.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución: Para resolver este ejercicio, basta con tener en cuenta la curva característica aproximada, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{8\ \text{V} - 0{,}7\ \text{V}}{8.000\ \Omega} = 0{,}00091 = 0{,}91\ \text{mA}$$

Actividad propuesta 10.1

¿Qué valor debería poseer R_S en el circuito de la Actividad resuelta 10.2 para conseguir una corriente directa por el diodo de 7,3 mA?

10.5 Dispositivos optoelectrónicos

Dentro de la denominación de dispositivos optoelectrónicos se incluyen todos aquellos elementos semiconductores capaces de producir una radiación luminosa comprendida dentro del espectro visible o fuera de él (infrarrojos), como lo son los diodos LED. También se incluyen los componentes sensibles a la luz, como, por ejemplo, los fotodiodos.

10.5.1. Diodos luminiscentes (LED)

Seguro que ya conoces este tipo de dispositivo electrónico, ya que poseen una gran aplicación como elementos señalizadores del encendido de cualquier equipo electrónico, como puede ser: un equipo de sonido, un ordenador, etc. Haciendo combinaciones con ellos, también pueden ser empleados para visualizar números y letras en pequeños indicadores luminosos (*displays*), con los cuales se pueden presentar los resultados en equipos de medida, calculadoras, etc.

En la Figura 10.23(a) se muestra el aspecto de un diodo LED y en la Figura 10.23(b) su representación esquemática.

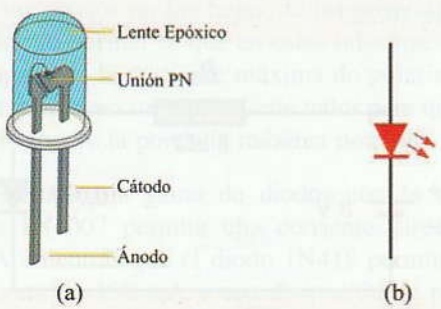


Figura 10.23. Diodo LED. (a) Aspecto físico. (b) Símbolo.

Actividad experimental 10.2

Consigue un diodo LED, estudia su aspecto y conéctalo a través de una resistencia serie de unos 430 Ω a una fuente de alimentación de 10 V, tal como se muestra en la Figura 10.24.

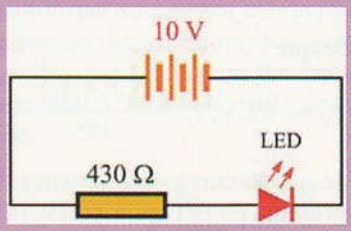


Figura 10.24.

Habrás podido comprobar que para que el diodo LED se ilumine, hay que conectarlo de tal forma que quede polarizado directamente. El terminal que representa al ánodo suele aparecer en el componente indicado con una marca (este terminal suele tener una longitud mayor que la del cátodo.) (Por si fuera poco, se añade un pequeño aplanamiento en la cápsula en las inmediaciones del terminal del cátodo). En el caso de no estar seguro de cuál es cada uno de los terminales, se puede verificar el estado de conducción con un polímetro, tal como se hacía con los diodos de unión PN.

¿Se enciende el diodo LED al polarizarlo directamente?

Los diodos LED se fabrican mediante la unión de dos cristales semiconductores PN, a los que se les ha contaminado de una forma especial. Cuando una unión de este tipo se polariza con una tensión directa, al igual que ocurría con los diodos convencionales, los electrones de valencia del cristal tipo N atraviesan la unión y se recombinan con los huecos del cristal tipo P. Dado que dichos electrones se trasladan de un nivel de energía más alto a uno más bajo, se produce una liberación de energía, que en este tipo de diodos se manifiesta en forma de radiaciones electromagnéticas dentro del espectro luminoso.

Los diodos LED se fabrican con elementos especiales, como arseniuro de galio (GaAs) y fósforo. Para conseguir modificar la longitud de onda de la radiación de la onda luminosa y así conseguir diodos con emisiones de diferentes colores (roja, naranja, verde, amarilla, azul, o infrarroja), se contaminan los cristales de una forma adecuada. Así por ejemplo, los diodos luminiscentes fabricados con galio y fósforo (GaP) emiten luz roja cuando se les añade óxido de cinc y emiten luz verde con la adición de nitrógeno.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

10.5.1.1. Características de los LED

Aparte del color de los diodos luminiscentes, sus características más relevantes son similares a las de los diodos convencionales:

La ***tensión directa*** (V_F) es la caída de tensión que se produce entre los extremos del diodo LED cuando por él fluye la corriente directa. Esta tensión suele ser del orden de 1,5 a 2,2 V para la mayor parte de los modelos. Cuando se desconoce la tensión directa exacta, bastará con tomar como valor aproximado 2 V.

La ***corriente de excitación directa*** (I_F) es la corriente que debe circular por el diodo LED para alcanzar la intensidad luminosa esperada. Para la mayoría de los modelos, esta corriente está comprendida entre 10 y 50 mA.

La ***corriente inversa*** (I_R) es la máxima corriente que puede fluir por el diodo luminiscente cuando a éste se le aplica una tensión de polarización inversa. Este valor suele estar en torno a los 10 μA.

La ***disipación de potencia*** es aquella parte de la potencia que el diodo luminiscente no convierte en luz y que acaba degradándose en calor, por lo que tiene que evacuarla al exterior. Por esta razón, los diodos LED se conectan en serie con una resistencia, con el fin de limitar la corriente que fluye por ellos. Para calcular dicha resistencia, se aplica la ley de Ohm al circuito de la Figura 10.25:

$$I_F = \frac{V - V_F}{R_s} \qquad R_s = \frac{V - V_F}{I_F}$$

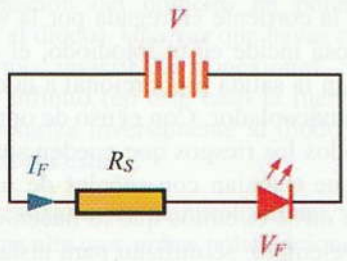


Figura 10.25. Conexión de un diodo LED.

Actividad resuelta 10.3

Se quiere determinar la resistencia que hay que conectar en serie con un diodo LED para una tensión de fuente de 12 V. Para ello, tendremos en cuenta que su tensión directa es de 2 V y que con 20 mA de corriente directa se consigue una emisión luminosa aceptable.

Solución: Aplicando la ley de Ohm al circuito, tendremos que:

$$R_s = \frac{V - V_F}{I_F} = \frac{12 - 2}{0{,}020} = 500\ \Omega$$

Actividad propuesta 10.2

¿Cuál tendría que ser el valor de la resistencia de la Actividad resuelta 10.3, si la tensión de la fuente fuese 9 V?

Las ventajas que poseen los diodos LED, para aplicaciones de señalización, frente a las pequeñas lámparas incandescentes son innumerables, tales como pueden ser: gran duración, elevada resistencia mecánica frente a los impactos y las vibraciones, tamaño reducido y pequeño consumo, que los hacen ideales para aplicaciones en combinación con otros semiconductores.

Una de las aplicaciones que se puede hacer de los diodos LED, es la fabricación de indicadores numéricos de siete segmentos (*displays*). Mediante siete diodos luminiscentes dispuestos como se indica en la Figura 10.26, se pueden representar dígitos del 0 al 9. Para ello, se excitan simultáneamente las combinaciones de diodos que se correspondan en cada caso.

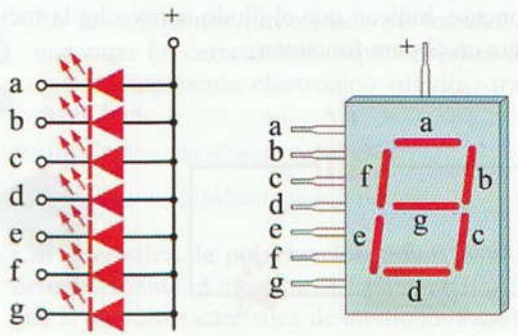


Figura 10.26. Indicador de siete segmentos con diodos LED.

Actividad propuesta 10.3

¿Qué diodos habrá que excitar simultáneamente en el indicador de siete segmentos de la Figura 10.26 para que se ilumine el número 5?

En la actualidad, los indicadores de cristal líquido (LCD) están desplazando a los indicadores con diodos luminiscentes a campos de aplicación más reducidos.

10.5.2. Fotodiodos

Este dispositivo es un diodo especialmente diseñado para que sea sensible a las radiaciones luminosas que en él inci-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

dan, de tal forma que al aumentar éstas, también lo haga la corriente inversa que fluya por el fotodiodo. Una de las aplicaciones fundamentales de este dispositivo es como fotodetector, elemento capaz de transformar una magnitud luminosa en eléctrica.

Veamos cómo funciona este dispositivo: recuerda cómo cuando a un diodo unión PN se le aplicaba energía térmica se rompía un número determinado de enlaces covalentes y, por tanto, aparecía en ambos cristales un número determinado de portadores de carga minoritarios. Pues bien, en este tipo de diodos además aparece un aumento de portadores minoritarios cuando se aplica energía en forma de radiaciones luminosas. De esta forma, si conectamos un fotodiodo con una tensión de polarización inversa, fluirá una pequeña corriente inversa por él. Los fotodiodos se fabrican de tal forma que la luz pueda incidir en ellos, de tal forma que cuando la intensidad de la radiación luminosa se hace más grande, aumentan los portadores minoritarios y con ellos la corriente inversa. Así se consigue que exista una relación determinada entre la luz y la corriente.

En la Figura 10.27, se muestra el circuito de un fotodiodo polarizado inversamente. Las flechas, que apuntan hacia el componente, indican que el diodo aprovecha la incidencia de la luz en él para funcionar.

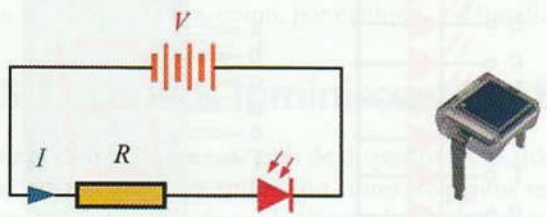


Figura 10.27. Circuito con fotodiodo.

En la Figura 10.28 se muestra la curva de polarización inversa de un fotodiodo.

Observa cómo, al aumentar la intensidad de la radiación luminosa (su unidad de medida es el lux), también lo hace la corriente inversa.

Una de las aplicaciones que se puede hacer del fotodiodo, en combinación con el diodo luminiscente, es la fabricación de un *optoacoplador*, tal como se muestra en la Figura 10.29. Estos dos elementos se integran en un solo elemento.

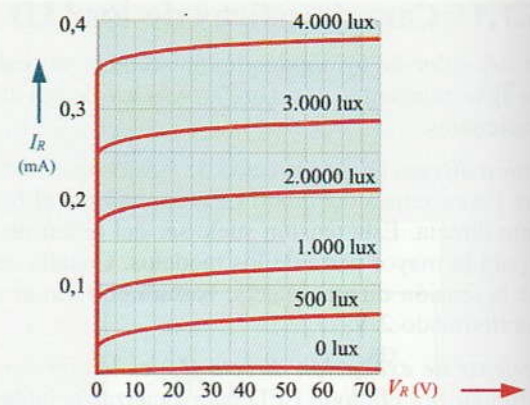


Figura 10.28. Curvas características de un fotodiodo.

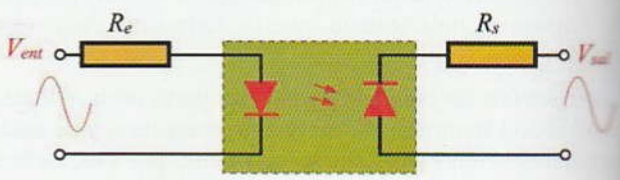


Figura 10.29. Optoacoplador.

Con un optoacoplador se pueden aislar eléctricamente dos circuitos entre los que hay que intercambiar una determinada señal. La señal de entrada se aplica al diodo LED, con lo que éste genera una intensidad luminosa que estará en función de la corriente entregada por la señal. Esta radiación luminosa incide en el fotodiodo, el cual generará una corriente en la salida proporcional a la entregada a la entrada del optoacoplador. Con el uso de optoacopladores se eliminan todos los riesgos que pueden surgir al conectar circuitos que trabajan con señales de muy pequeñas tensiones, con otros circuitos que lo hacen con tensiones elevadas. Por ejemplo, se utilizan para aislar la salida de un ordenador con circuitos exteriores que estén alimentados con tensiones peligrosas. También se utilizan en electromedicina para aislar los circuitos de los electrodos que se han de aplicar al cuerpo humano y en otras muchas aplicaciones.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

10.1 ¿Cómo se puede comprobar el buen estado de un diodo? Consigue un diodo y un polímetro. Para comprobar si el estado de la unión del diodo es perfecto, basta con conectar el polímetro utilizado como óhmetro entre sus terminales, de tal forma que la punta de prueba negra (−) esté unida al ánodo del diodo y la roja (+) al cátodo (Figura 10.30).

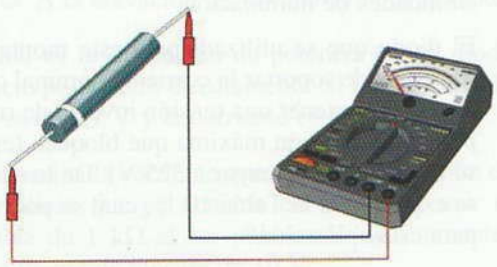


Figura 10.30. Comprobación de un diodo mediante el óhmetro.

Si el resultado de la medida es cero ohmios, será señal de que el diodo está en buen estado (la fuente de alimentación del óhmetro ha polarizado directamente al diodo). Una vez que hayas comprobado esto último, invierte las conexiones. Si el polímetro indica infinito (en este caso la fuente de alimentación polariza inversamente al diodo), el diodo está en perfecto estado.

Si al realizar estas comprobaciones se mide una resistencia alta con ambas polarizaciones, nos indicará que el diodo está abierto. En el caso de que se mida una resistencia baja con ambas polarizaciones estaremos ante un diodo en cortocircuito. En el caso de que se mida una resistencia relativamente baja con la polarización inversa estaremos ante un diodo con fugas.

Conviene tomar ciertas precauciones cuando se trata de comprobar diodos de pequeña potencia, ya que se puede dar el caso de que la corriente que proporciona el óhmetro para tomar la medida sea suficiente para destruir el diodo. En estos casos, es aconsejable el uso de las escalas más altas del óhmetro, ya que éstas reducen la corriente de medida a valores aceptables.

10.2 Identificación de las características de los diodos semiconductores. Toma un conjunto de diferentes diodos semiconductores, determina su polaridad y comprueba con el óhmetro su estado. A continuación, identifica su referencia y consigue las hojas de especificaciones técnicas que facilita su fabricante. Con ellas determina sus características más relevantes. Una vez hecho esto, observa las diferencias existentes entre las siguientes características de dichos diodos: corriente y potencia nominal, tensión de ruptura y corriente inversa. Para facilitar la tarea de identificación de los diodos, consigue los códigos y normas internacionales más usuales para identificar dispositivos semiconductores y comprueba las referencias dadas por los fabricantes de los diodos.

En las siguientes direcciones de Internet podrás encontrar las características que necesites de cualquier componente electrónico (diodos, transistores, CI, etc.).

http://www.datasheetlocator.com/es/

http://www.datasheetcatalog.net/es/

10.3 Característica de polarización de un diodo de silicio. Mediante el circuito de la Figura 10.31 averigua la curva característica de un diodo. Para hacerlo correctamente, ten en cuenta las siguientes consideraciones:

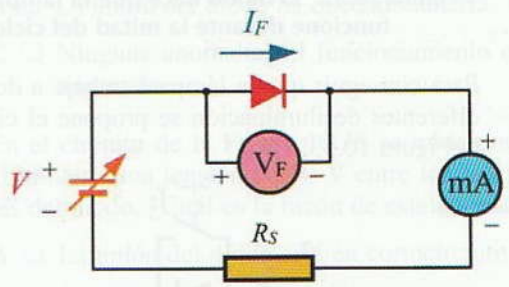


Figura 10.31. Circuito para obtener la curva característica de un diodo.

a) Consulta las características del diodo por ensayar que facilitan los fabricantes en las hojas de especificaciones técnicas y ten en cuenta los valores máximos de tensión inversa y corriente directa del mismo.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

b) Comienza el ensayo con una tensión de 0 voltios; ve aumentando los valores de tensión y tomando lecturas de los diferentes aparatos de medida en varios puntos, procurando no sobrepasar el valor máximo de corriente directa del diodo.

c) Invierte la polaridad de la fuente de alimentación y toma varios puntos de medida, procurando no sobrepasar el valor máximo de la tensión máxima de ruptura del diodo.

d) Con los puntos obtenidos, traza la curva característica del diodo. Compara la curva obtenida con la facilitada por el fabricante.

10.4 Circuito para dos niveles de iluminación. Se trata de aprovechar la propiedad que posee el diodo semiconductor de conducir en un solo sentido. El circuito consiste, básicamente, en conectar en serie un diodo a una lámpara sometida a corriente alterna, tal como se indica en la Figura 10.32. Dado que el diodo sólo permite el paso de la corriente en un solo sentido, los semiciclos negativos de la red de C.A. quedan anulados para la lámpara. De esta forma, la tensión que aparece en ella será igual al valor medio de los semiciclos positivos. Esta tensión viene a ser un poco menor de la mitad del valor eficaz de la tensión alterna original. Con este circuito, podemos conseguir reducir aproximadamente a la mitad la tensión a que sometemos a la lámpara y con ello reducir la potencia y la luminosidad que ésta produce.

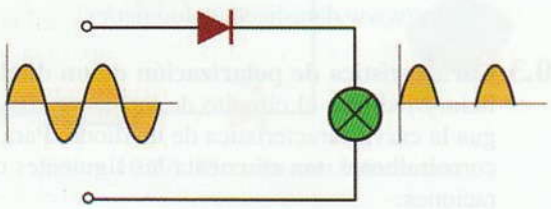


Figura 10.32. El diodo hace que la lámpara sólo funcione durante la mitad del ciclo.

Para conseguir que la lámpara trabaje a dos niveles diferentes de iluminación se propone el circuito de la Figura 10.33.

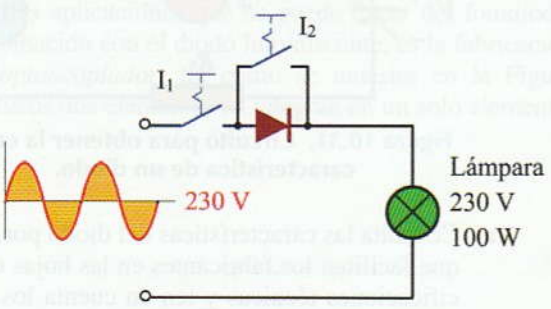


Figura 10.33. Circuito para conseguir dos niveles de iluminación.

Su funcionamiento es como sigue: estando el interruptor I_1 cerrado y el I_2 abierto, toda la corriente debe fluir por el diodo, por lo que, teniendo en cuenta que el valor eficaz de la C.A. es de 230 V, la tensión que aparece en la lámpara es igual a:

$$V_{medio} = \frac{V_{máx}}{\pi} = \frac{V_{eficaz} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = \frac{325}{\pi} 104 \text{ V}$$

por lo que ésta se enciende a media luz. Si ahora cerramos el interruptor I_2, el diodo queda puenteado y anulado, con lo que en la lámpara aparece toda la tensión y funciona a plena potencia.

Monta el circuito propuesto en la Figura 10.33 y comprueba su funcionamiento, midiendo las diferentes tensiones que aparecen en él para las dos posibilidades de iluminación.

El diodo que se utilizará para este montaje deberá ser capaz de soportar la corriente nominal del circuito, así como tener una tensión inversa de ruptura superior a la tensión máxima que bloquea (en este caso tendrá que ser mayor a 325 V). De los diodos que se exponen en la Tabla 10.1, ¿cuál se podría utilizar para esta aplicación?

Tabla 10.1.

Diodo	$V_{inversa\ pico}$	$I_{máx}$
1N4003	200 V	1 A
1N4004	400 V	1 A
1N5406	600 V	3 A

El diodo conectado en serie como reductor de la tensión en circuitos de C.A. para cargas resistivas también se puede utilizar para adaptar receptores de 110 V a redes de 230 V. También se suelen usar para conseguir dos niveles de potencia en un calefactor eléctrico.

10.5 Identificación de componentes optoelectrónicos. Consigue los esquemas de algún circuito electrónico donde aparezcan diodos LED, fotodiodos y optoacopladores. Reconoce su ubicación en el circuito, comprueba su polarización y examina su función en dicho circuito.

Al finalizar cada una de estas actividades, deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para su adecuada documentación (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Ediciones Paraninfo © Ediciones

WWW.AUTODIDACTA.INFO

AUTOEVALUACIÓN

10.1 ¿A qué tensión de polarización comienzan a conducir los diodos de silicio?

A ❑ 0,3 V.

B ❑ 1 V.

C ❑ 0,7 V.

10.2 ¿A qué se debe una corriente inversa elevada por el diodo?

A ❑ A la aplicación de una tensión directa también elevada.

B ❑ A la aplicación de una tensión inversa también elevada.

C ❑ A la elevación de la corriente por el diodo.

10.3 ¿Cuál es la disipación de potencia en un diodo de silicio polarizado directamente, si la tensión del diodo es de 0,7 V y la corriente es 500 mA?

10.4 Determina la corriente que se establece por un diodo de silicio que se conecta en serie con una resistencia de 1 kΩ al ser polarizado directamente por una fuente de tensión de 10 V.

10.5 En la Figura 10.34 está representada la curva característica del diodo comercial 1N4007. En el caso de que alimentemos a este diodo con una fuente de tensión de 5 V y a través de una resistencia limitadora de 5 Ω, determina la línea de carga, los valores de V y de I, en el punto de trabajo del diodo, para una temperatura de 25 °C y la disipación de potencia de éste.

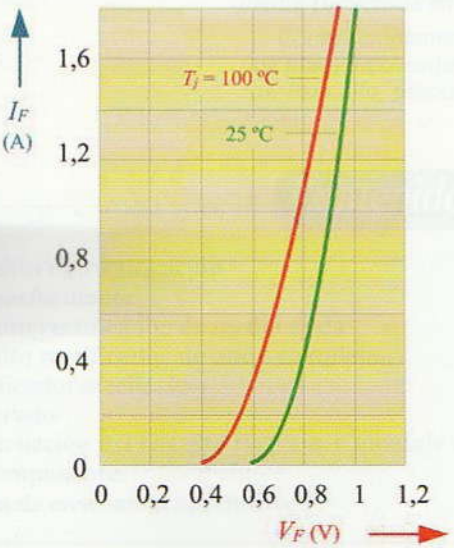


Figura 10.34. Curva característica del diodo 1N4007.

10.6 En la Tabla 10.2 se muestran algunas de las especificaciones de una serie de diodos. ¿Cuál de estos diodos trabajaría en óptimas condiciones en el circuito de la Figura 10.35?

Tabla 10.2.

Diodo	$V_{\text{inversa pico}}$	$I_{\text{máx}}$
1N914	75 V	200 mA
1N5404	400 V	3 A
1N4003	200 V	1 A

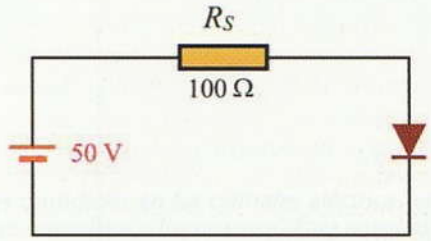


Figura 10.35.

10.7 ¿Qué valor deberá tener la resistencia R_s en el circuito de la Figura 10.35 para poder utilizar el diodo 1N914.

10.8 En el circuito de la Figura 10.35 se mide con un voltímetro una tensión de 0 V entre los terminales del diodo y 50 V entre los terminales de la fuente de alimentación. ¿Cuál es la posible causa de esta anomalía?

A ❑ La unión del diodo está en cortocircuito.

B ❑ La unión del diodo ha quedado abierta.

C ❑ Ninguna anomalía. El funcionamiento es el adecuado.

10.9 En el circuito de la Figura 10.35 se mide con un voltímetro una tensión de 50 V entre los terminales del diodo. ¿Cuál es la razón de esta anomalía?

A ❑ La unión del diodo está en cortocircuito.

B ❑ La unión del diodo ha quedado abierta.

C ❑ Ninguna anomalía. El funcionamiento es el adecuado.

10.10 ¿Qué resistencia comercial habrá que conectar a un diodo LED para que éste trabaje con una corriente directa de unos 18 mA, si se le conecta a una tensión de 50 V?

© Ediciones Paraninfo

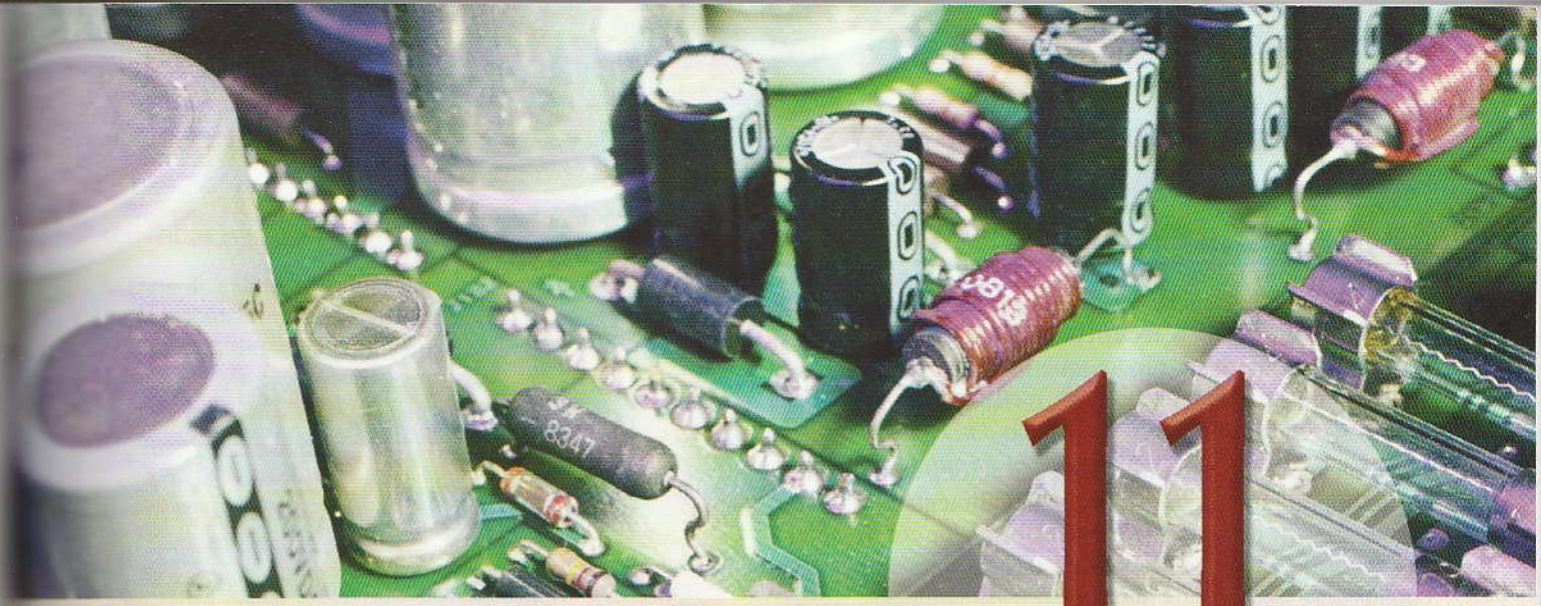
WWW.AUTODIDACTA.INFO

AMPLIACIÓN

10.1 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, busca un fabricante de diodos para circuitos electrónicos, analiza las características de los diferentes tipos fabricados, como pueden ser: tipos de diodos fabricados, aplicaciones, dimensiones, denominaciones comerciales, tensión inversa pico, intensidad máxima directa, curvas características, etc.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



11

Aplicación de los diodos a circuitos de rectificación

La energía eléctrica se produce en grandes cantidades en las centrales eléctricas en forma de corriente alterna y de esta forma es como se suministra a los usuarios. Para aquellas aplicaciones donde sea necesaria una alimentación con corriente continua (alimentación de equipos electrónicos, motores de C.C., equipos de carga de baterías, etc.) se necesita disponer de dispositivos que sean capaces de convertir la C.A. en C.C. Nos referimos a las fuentes de alimentación.

A veces no es necesario echar mano de tales dispositivos, ya que los aparatos van alimentados por pilas, y éstas generan directamente C.C. Por desgracia, hasta ahora, no existen pilas suficientemente duraderas y potentes como para hacer superfluos los circuitos de conversión.

Sólo en algunos casos, cuando la potencia eléctrica de los aparatos es baja, como por ejemplo una radio de transistores de hasta 2 W, se utilizan pilas o acumuladores. Cuando el consumo de energía eléctrica es mayor, el uso de éstas es enormemente más costoso y tendríamos que estar renovándolas continuamente, si deseamos que los aparatos funcionen. Por esta razón, en la mayoría de los casos, se utiliza la C.A. como fuente principal de alimentación, debidamente convertida en C.C. por los circuitos de conversión correspondientes.

Como complemento práctico, aprenderemos las técnicas en el proceso de la elaboración de una placa de circuito impreso, así como las de soldadura y montaje de componentes electrónicos. Para ello, propondremos la elaboración de una pequeña fuente de alimentación básica.

Contenido

11.1. **Circuitos de rectificación**
11.2. **El transformador**
11.3. **Circuito rectificador de media onda**
11.4. **Circuito rectificador de onda completa**
11.5. **Rectificadores trifásicos**
11.6. **El filtrado**
11.7. **Construcción del circuito impreso y montaje de sus componentes**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los circuitos de rectificación.
- Operar diestramente las herramientas utilizadas en las operaciones de sustitución, soldadura y desoldadura de componentes en circuitos electrónicos, asegurando la calidad final de las intervenciones.
- Diagnosticar averías en circuitos electrónicos analógicos de aplicación general, empleando procedimientos sistemáticos y normalizados en función de distintas consideraciones.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.1 Circuitos de rectificación

Como circuito rectificador se conoce aquel que tiene la función de convertir o rectificar la C.A. en C.C. Dependiendo del número de diodos que utilicemos y cómo los conectemos, se pueden construir rectificadores de media onda y de onda completa.

Por lo general, los circuitos de rectificación suelen ser una parte importante de las fuentes de alimentación. Estas fuentes suelen disponer de un transformador con el objeto de reducir la tensión de la red eléctrica a valores más adecuados para los equipos que se van a alimentar.

Además de estos elementos, las fuentes de alimentación suelen incorporar en su etapa final un circuito de filtrado, con el fin de conseguir una corriente lo más continua posible.

En la Figura 11.1 se muestra, de una forma esquemática, las diferentes etapas de las fuentes de alimentación que vamos a estudiar en esta unidad didáctica.

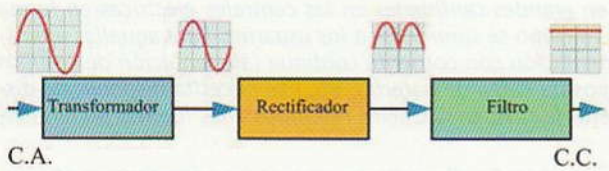


Figura 11.1. Etapas de una fuente de alimentación simple.

Antes de pasar a explicar el funcionamiento de los diferentes circuitos rectificadores será de especial interés conocer qué es un transformador, qué función posee y cuáles son sus características más relevantes.

11.2 El transformador

Se puede decir que un transformador es una máquina eléctrica estática que es capaz de reducir o aumentar la tensión de una corriente alterna sin modificar la frecuencia.

Posee dos bobinados: uno primario y otro secundario (Figura 11.2). Estos bobinados están arrollados sobre un núcleo de hierro, lo que hace que ambos estén acoplados magnéticamente.

En el caso de que en el bobinado secundario haya más vueltas que en el primario, la tensión alterna, que aparece en el secundario, es más alta que la aplicada al primario y viceversa. Lo que indica que un mismo transformador puede actuar tanto como elevador de tensión como reductor.

N_1 = N.º de espiras del primario
N_2 = N.º de espiras del secundario
V_1 = Tensión del primario
V_2 = Tensión del secundario
Φ = Flujo magnético común

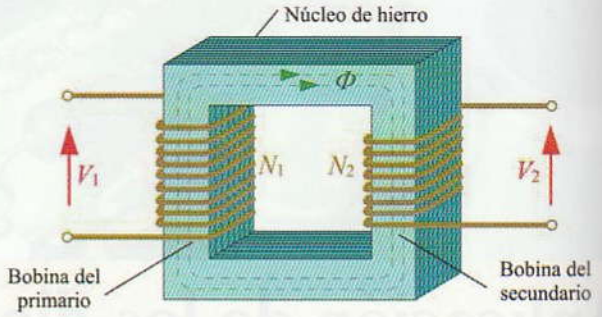


Figura 11.2. Magnitudes eléctricas y magnéticas de un transformador.

Al conectar el bobinado primario de N_1 espiras a una tensión alterna V_1, se produce en el núcleo de hierro un flujo magnético variable Φ de carácter senoidal. Este flujo magnético variable se establece a lo largo de todo el núcleo y corta los conductores del bobinado secundario. Al ocurrir este hecho, se induce una fuerza electromotriz en el secundario. El valor de esta f.e.m. inducida dependerá, entre otras cosas, del número de espiras del secundario.

De esta forma, la transferencia de energía eléctrica se hace a través del campo magnético variable que aparece en el núcleo del transformador.

En el caso de que N_1 sea igual a N_2, la tensión V_2, que aparecerá en el secundario, será exactamente igual que la aplicada al primario.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que el del primario, la tensión del secundario también será mayor.

En general, se cumple que:

$$N_1 \cdot V_2 = N_2 \cdot V_1$$

Para expresar la relación existente entre el primario y el secundario, se utiliza la ***relación de transformación (m)***. Este valor se obtiene realizando el cociente del número de espiras del primario y del secundario, es decir:

$$m = \frac{N_1}{N_2}$$

Si está en vacío el transformador (sin receptor en su secundario), se cumple que:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 11.1

Se trata de calcular la relación de transformación de un transformador que posee 100 espiras en su primario y 1.000 en su secundario.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{100}{1.000} = 0{,}1$$

Actividad resuelta 11.2

¿Cuál será la tensión que aparecerá en el secundario del transformador de la Actividad resuelta 11.1, si le aplicamos 10 V en el primario?

Como

$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

despejando

$$V_2 = \cdots = \frac{10}{0{,}1} = 100 \text{ V}$$

11.2.1. Potencia nominal de un transformador

La potencia nominal de un transformador monofásico se obtiene del producto de su tensión nominal primaria por la intensidad de la corriente nominal primaria. Es decir:

$$P_N = V_N \cdot I_N$$

Se entiende por tensiones y corrientes nominales los valores para los cuales ha sido proyectado el transformador para que sus aislantes no se deterioren (por el efecto de la tensión) y para que los conductores no se calienten excesivamente por el efecto Joule. De esta forma, un transformador trabajando a sus características nominales evacuará el calor que produce sin dificultad, manteniendo una temperatura de trabajo no peligrosa.

Es por esta razón por la que en el momento de seleccionar la potencia nominal de un transformador comercial para alimentar a un determinado circuito, se hace necesario hacer una valoración previa de la potencia que va a demandar dicho circuito, escogiendo aquel transformador que posea una potencia nominal superior a la demandada.

11.3 Circuito rectificador de media onda

Cuando se introduce una tensión de C.A. a la entrada del circuito, mostrado en la Figura 11.3, en la salida aparece una tensión de C.C. pulsante. La resistencia R_L representa al receptor al que se le suministra C.C.

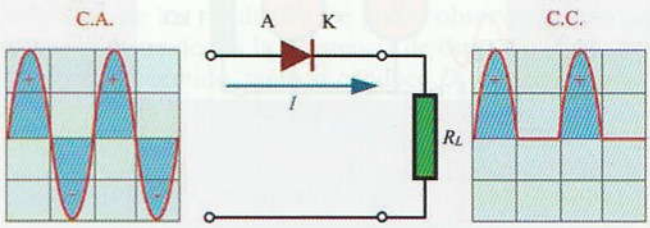


Figura 11.3. Circuito rectificador de media onda.

Este circuito funciona de la siguiente forma: en el momento en que los valores de la tensión instantánea son positivos y superiores a la tensión umbral del diodo (recuerda: 0,7 V para el silicio y 0,3 V para el germanio), éste se polariza directamente y, por tanto, aparece una corriente eléctrica por R_L. En el instante en que la tensión de C.A. cambia de positiva a negativa, (siguiente semiciclo), el diodo queda polarizado inversamente y, no teniendo en cuenta la corriente de fuga, la corriente por R_L se interrumpe. Por esta razón, este semiciclo no aparece en la curva de la tensión continua de la salida.

En el caso de que se invirtiese la polaridad del diodo, el resultado obtenido sería el que se muestra en la Figura 11.4.

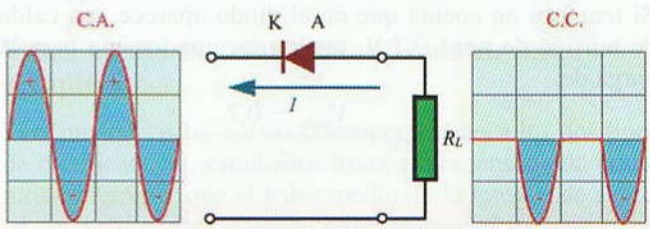


Figura 11.4. Al invertir el diodo aparece en la salida el semiciclo negativo.

Valor medio de tensión rectificada de media onda

Actividad experimental 11.1

Con ayuda del entrenador didáctico vamos a obtener, de una forma experimental, la relación existente entre el valor pico máximo de la tensión de C.A. aplicada a la entrada y el valor medio de C.C. de la tensión de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

salida correspondiente a un circuito rectificador de media onda. Para ello, monta el circuito de la Figura 11.5. A continuación, mide con un voltímetro de C.A. el valor eficaz de la tensión de entrada (V_1) y con un voltímetro de C.C. el valor medio de la tensión de salida del rectificador (V_2).

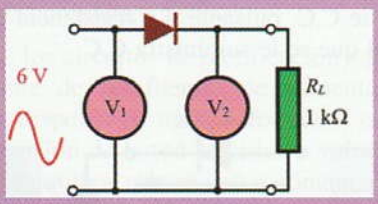


Figura 11.5.

Teniendo en cuenta que la relación existente entre el valor pico máximo de la C.A. y su correspondiente valor eficaz es: $V_{máx} = \sqrt{2}\, V_{eficaz}$ determina la relación aproximada entre el valor medio de la onda rectificada (V_2) y el valor pico máximo.

En el caso de que se desprecie la caída de tensión producida por el diodo y considerando que el valor máximo de la tensión no varía, se puede demostrar matemáticamente que el valor medio de la señal de media onda es igual a:

$$V_{med} = \frac{V_{máx}}{\pi}$$

A este valor también se lo denomina de C.C., ya que va a ser el que aparezca en la lectura de un voltímetro de C.C. ($V_{med} = V_{CC}$).

Si tenemos en cuenta que en el diodo aparece una caída de tensión de unos 0,7 V, tendremos una tensión para la carga de:

$$V_{CC} = \frac{V_{máx} - 0{,}7}{\pi}$$

Actividad resuelta 11.3

¿Cuál será la lectura de un voltímetro de C.C. conectado a la salida de un rectificador de media onda si a su entrada se le aplica una tensión alterna senoidal de 230 V de valor eficaz?

Solución: Primero calculamos el valor máximo de la tensión:

$$V_{máx} = V_{efi}\sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325{,}27 \text{ V}$$

$$V_{CC} = \frac{325{,}27 - 0{,}7}{\pi} = 103{,}31 \text{ V}$$

Intensidad de corriente por el diodo

Para determinar esta corriente, lo único que hay que hacer es tener en cuenta la tensión de C.C., la resistencia de carga R_L:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Hay que tener en cuenta que, en este tipo de rectificadores, la corriente que atraviesa al diodo rectificador es la misma que fluye por la carga.

Es muy importante conocer el valor de la corriente de C.C. por el diodo, ya que ésta no debe ser mayor, en ningún caso, a la corriente nominal que aparece en las hojas de especificaciones técnicas que proporciona el fabricante de diodos. En caso contrario, pondríamos en peligro al diodo, por no poder disipar el calor generado por efecto Joule en el mismo (véase el caso práctico en la Actividad práctica de laboratorio 11.2 propuesta al final de esta unidad didáctica).

Tensión inversa máxima del diodo

En el semiciclo en el que el diodo no conduce, éste se polariza inversamente y se comporta como un interruptor abierto. Si ahora analizamos la malla cerrada que se forma en el circuito de la Figura 11.6, observaremos que toda la tensión que ha sido bloqueada aparece en los terminales de dicho diodo. Como es lógico, deberemos evitar a toda costa que el diodo trabaje con tensiones inversas mayores que su tensión inversa pico, de lo contrario se alcanzaría la ruptura de éste. Este aspecto será de vital importancia a la hora de dimensionar los diodos necesarios para un circuito de rectificación (véase el caso práctico en la Actividad práctica de laboratorio 11.2 propuesta al final de esta unidad didáctica).

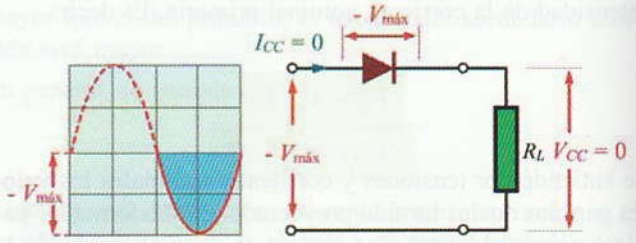


Figura 11.6. En polarización inversa el diodo soporta la tensión máxima de la C.A.

11.4 Circuito rectificador de onda completa

El circuito rectificador de media onda no proporciona una corriente continua demasiado perfecta. Esto es debido a que sólo es rectificada la mitad de un ciclo de la corriente alterna.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Para mejorar la rectificación, de tal forma que queden rectificados tanto los semiciclos positivos como los negativos, se hace necesario utilizar otro tipo de circuitos, como el rectificador de onda completa mediante el transformador con toma intermedia o el puente rectificador de onda completa.

11.4.1. Rectificador de onda completa mediante transformador con toma intermedia

Para realizar este circuito, es necesario disponer de un transformador especial que posea una toma intermedia en su bobinado secundario y un par de diodos semiconductores. El circuito quedaría tal como se muestra en la Figura 11.7. En la Figura 11.8 se puede apreciar la forma de la tensión rectificada en la salida.

Al realizar la conexión en el punto intermedio del bobinado del secundario, se consigue dividir a la mitad la tensión que aparece en cada una de las dos partes de dicho bobinado.

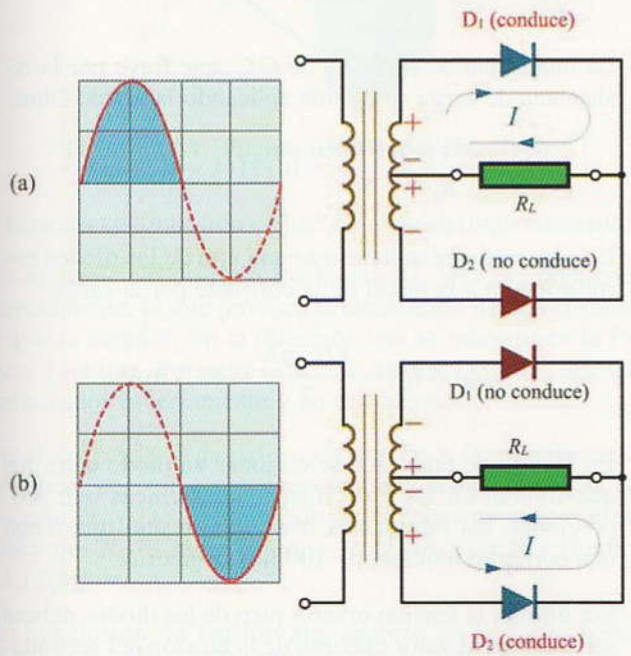


Figura 11.7. Circuito rectificador de onda completa.

En el circuito rectificador de la Figura 11.7(a), se puede apreciar cómo en el primer semiciclo la tensión de salida de la parte superior del bobinado del secundario del transformador polariza directamente al diodo D_1 y hace que circule una intensidad I por la resistencia R_L (R_L hace las veces de receptor o carga). Durante este semiciclo, el diodo D_2 permanece polarizado inversamente y, por consiguiente, no conduce ninguna corriente.

En el siguiente semiciclo la tensión cambia de polaridad y la tensión de salida de la parte inferior del bobinado polariza ahora directamente al diodo D_2, mientras que el diodo D_1 queda polarizado inversamente. Por lo tanto, ahora circula la corriente por D_2 y por la resistencia de carga R_L según se indica en la Figura 11.7(b).

A la vista de los resultados, se puede observar que la corriente que atraviesa a la resistencia de carga fluye siempre en el mismo sentido, tanto si conduce D_1 como si lo hace D_2, por lo que la tensión que aparecerá en la resistencia de carga (tensión de salida del rectificador) es de onda completa, tal como se muestra en la Figura 11.8.

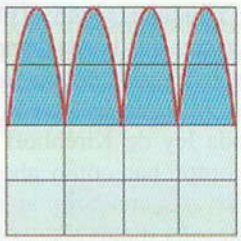


Figura 11.8. Tensión rectificada en R_L.

La tensión que aparece en cada una de las dos mitades del secundario corresponde a la mitad de la tensión que surge en el conjunto de los terminales de salida del transformador.

Hay que hacer notar que, mediante este sistema, el transformador deberá disponer de un bobinado secundario con el doble de espiras. Esto encarece sensiblemente el sistema.

Valor medio de tensión rectificada de onda completa

Si comparamos las curvas correspondientes a los dos tipos de rectificadores, estudiados hasta ahora, enseguida podemos comprobar que el valor medio de la tensión de salida de un rectificador de onda completa es el doble que el de media onda.

$$V_{CC} = 2\,\frac{(V_{máx} - 0{,}7)}{\pi}$$

Corriente nominal por los diodos

Para calcular la corriente de C.C. que atraviesa la resistencia de carga se opera como en el caso de la media onda, tomando como tensión de C.C. la proporcionada entre la toma media y uno de los extremos del bobinado secundario del transformador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Sin embargo, si observamos detenidamente el proceso de conducción de los diodos (Figura 11.7), podremos comprobar cómo cada uno de los diodos sólo conduce durante la mitad de un ciclo de la C.A., por lo que la corriente media que fluye por cada uno de ellos será la mitad.

En la carga:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

y en los diodos:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{CC}}{2}$$

Tensión inversa pico de los diodos

Cuando el diodo D_1 conduce, según se puede apreciar en la Figura 11.9, cortocircuita sus bornes, por lo que la caída de tensión que aparece en él es despreciable. Mientras, el otro diodo no conduce y bloquea la tensión en sus bornes. Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a la malla que se forma, podremos comprobar cómo ahora toda la tensión (V_T), correspondiente al secundario, aparece en sentido de bloqueo en los bornes del diodo D_2.

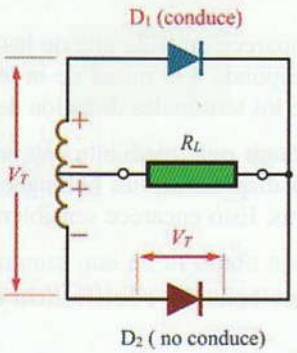


Figura 11.9. Tensión inversa por los diodos.

Por esta razón, los diodos de un rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia deben ser capaces de soportar, como mínimo, una tensión inversa pico mayor que V_T. Observa que esta tensión es el doble que la que corresponde a la mitad de cada uno de los bobinados del secundario del transformador.

Actividad resuelta 11.4

En el circuito rectificador de onda completa de la Figura 11.7 el transformador proporciona una tensión en el secundario de 20 V. Teniendo en cuenta la caída de tensión producida en los diodos, determina la tensión de C.C. a que quedará sometida la resistencia de carga de 50 Ω, así como la corriente que recorrerá a la misma. Averigua también la corriente nominal de los diodos, así como su tensión inversa pico.

Solución: La tensión pico máxima que aparece en el secundario es:

$$V_{máx} = V \cdot \sqrt{2} = 20 \cdot \sqrt{2} = 28{,}28 \text{ V}$$

La tensión que hay que tener en cuenta para determinar la tensión rectificada será la que corresponda a la mitad del bobinado, es decir:

$$\frac{28{,}28 \text{ V}}{2} = 14{,}14 \text{ V}$$

Teniendo en cuenta que cada vez que conduce uno de los diodos se produce una caída de tensión en el mismo de 0,7 V, el valor medio de la tensión de C.C. rectificada será entonces:

$$V_{CC} = 2\,\frac{V_{máx} - 0{,}7}{\pi} = 2\,\frac{14{,}14 - 0{,}7}{\pi} = 8{,}56 \text{ V}$$

La intensidad de corriente de C.C. que fluye por la resistencia de carga se calcula aplicando la ley de Ohm:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{8{,}56}{50} = 0{,}171 \text{ A} = 171 \text{ mA}$$

La corriente que atraviesa a cada uno de los diodos corresponderá a la mitad de la corriente por la carga:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{171 \text{ mA}}{2} = 85{,}5 \text{ mA}$$

En el caso de tener que seleccionar un diodo entre los que figuran en las especificaciones técnicas que proporcionan los fabricantes, bastará con uno que tenga una corriente nominal de 100 mA o superior.

Por último, la tensión inversa pico de los diodos deberá ser superior al valor máximo de la tensión del secundario, es decir:

$$V_{\text{inversa pico}} = 28{,}28 \text{ V}$$

¿Qué valor debería poseer la resistencia de carga para que la corriente por los diodos quedase limitada a 50 mA?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.4.2. El puente rectificador

Esta otra forma de obtener una tensión rectificada de onda completa es mucho más empleada que la anterior, ya que resulta más económica, posee un gran rendimiento y no necesita un transformador de toma intermedia.

El puente rectificador consta de cuatro diodos (Figura 11.10), que en muchos casos se encierran en un componente compacto, tal como se muestra en la Figura 11.11.

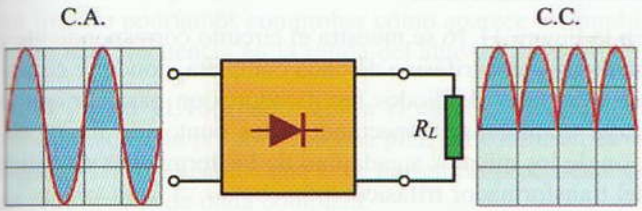


Figura 11.10. Puente rectificador.

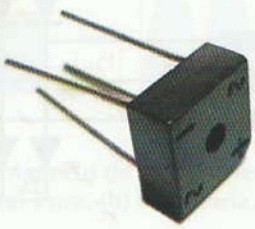


Figura 11.11. Puente rectificador integrado.

Veamos a continuación en qué consiste su funcionamiento.

En el semiciclo positivo los diodos D_2 y D_3 se polarizan directamente, lo que provoca la circulación de una corriente por la carga R_L en la dirección que se muestra en la Figura 11.12(a). Por otro lado, los diodos D_1 y D_4 quedan polarizados inversamente y no conducen.

En el semiciclo negativo los diodos D_1 y D_4 comienzan a conducir por estar polarizados directamente y dejan de hacerlo D_2 y D_3. La dirección de la corriente que se establece por R_L es la misma que en el caso anterior [Figura 11.12(b)].

En conclusión, la tensión que aparece en la carga posee siempre la misma polaridad, igual que ocurría en el otro rectificador de onda completa. En la Figura 11.13 se puede apreciar la forma de la tensión de salida del puente rectificador, así como los tiempos de conducción para cada uno de los cuatro diodos.

El valor medio de la tensión rectificada de onda completa se calcula de la misma forma que en el caso anterior, pero

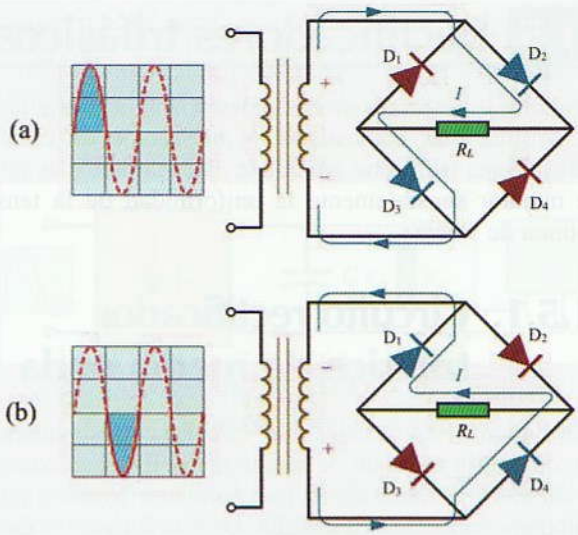


Figura 11.12. Funcionamiento del puente rectificador. (a) Conducen los diodos D_2 y D_3 mientras que D_1 y D_4 permanecen bloqueados. (b) Conducen D_1 y D_4 mientras que D_2 y D_3 bloquean la corriente.

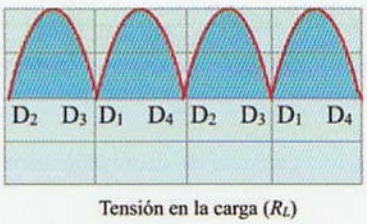


Figura 11.13. Tensión de salida de un puente rectificador.

teniendo en cuenta que el circuito siempre se conduce por dos de los diodos en serie y, por tanto, se ha tomado una caída de tensión doble en ellos ($2 \cdot 0{,}7 = 1{,}4$ V).

$$V_{CC} = 2\,\frac{V_{máx} - 1{,}4}{\pi}$$

Dado que las corrientes que circulan por cada pareja de diodos sólo lo hacen en la mitad de un período de la C.A., la corriente de C.C. será la mitad que la calculada para la resistencia de carga. Hay que tener en cuenta que estamos hablando de valores medios (véase el caso práctico en la Actividad práctica de laboratorio 11.3 propuesta al final de esta unidad didáctica).

Para calcular la tensión inversa pico a que quedan sometidos los diodos bastará con tener en cuenta la tensión del secundario de alimentación (en el caso de que exista transformador).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.5 Rectificadores trifásicos

Cuando se quieren obtener grandes potencias de salida de C.C. resulta más conveniente la utilización de circuitos rectificadores trifásicos. Mediante estos circuitos se consigue mejorar sensiblemente la uniformidad de la tensión continua de salida.

11.5.1. Circuito rectificador trifásico de media onda

En la Figura 11.14 se muestra el circuito correspondiente a un rectificador trifásico de media onda. En él se conectan tres diodos a la salida de un transformador trifásico con el secundario conectado en estrella. De esta forma, los diodos se conectan a cada una de las tensiones de fase del transformador, constituyendo tres circuitos monofásicos de media onda.

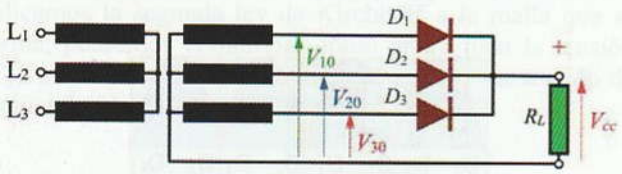


Figura 11.14. Circuito de un rectificador trifásico de media onda.

Como se aprecia en los gráficos de la Figura 11.15, correspondientes a la tensión de salida del rectificador, cada uno de los diodos conduce durante el tiempo que la tensión de fase correspondiente posee un valor más alto que las otras dos. La corriente fluye por cada uno de los diodos alternativamente, de tal forma que cada uno de los mismos sólo conduce durante un tercio de la corriente de salida. Para calcular la corriente por cada uno de los diodos habrá que dividir por tres la corriente por la carga.

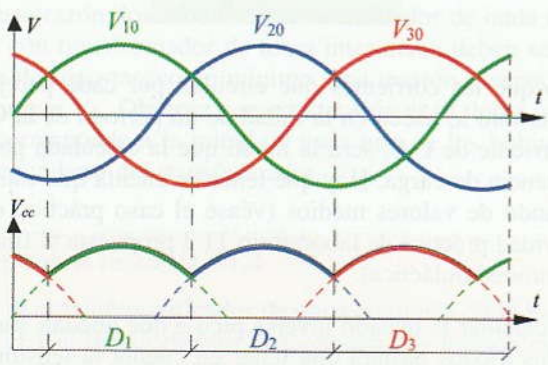


Figura 11.15. Tensión de entrada y salida de un rectificador trifásico de media onda.

11.5.2. Circuito rectificador trifásico de onda completa

Al igual que ocurría con los monofásicos, con este circuito rectificador se consigue una tensión continua de salida mucho más uniforme que con el de media onda. Además no requiere del neutro para su conexión. Por estas razones, el rectificador de onda completa es el que se emplea en aplicaciones industriales.

En la Figura 11.16 se muestra el circuito correspondiente a un rectificador trifásico de onda completa, donde se conectan tres pares de diodos rectificadores en paralelo con la carga a alimentar, conectándose los puntos de interconexión de los mismos a cada uno de los terminales de salida del transformador trifásico.

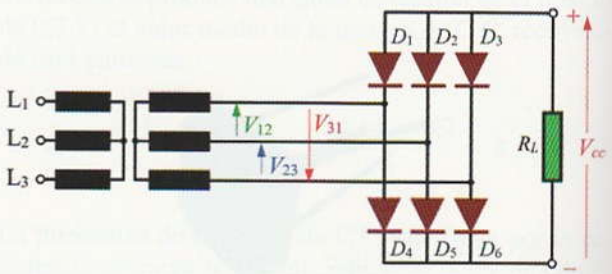


Figura 11.16. Circuito de un rectificador trifásico de onda completa.

Como se puede comprobar en la Figura 11.17 cada pareja de diodos se va sucediendo en la conducción, apareciendo en la salida una tensión continua con seis pulsos por período.

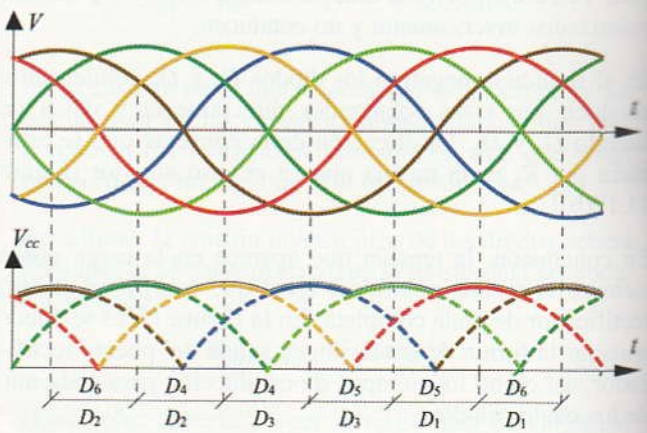


Figura 11.17. Tensión de entrada y salida de un rectificador trifásico de onda completa.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.6 El filtrado

La corriente de salida de un rectificador no se corresponde a una corriente continua ideal, como por ejemplo la que proporcionan las pilas y acumuladores. Normalmente esta corriente es de tipo pulsatorio, lo cual implica que existen variaciones de amplitud en ella. Este tipo de corriente no es muy recomendable en la mayoría de las aplicaciones, sobre todo para la alimentación de equipos electrónicos. Así, por ejemplo, si alimentásemos un amplificador de sonido, o un receptor de radio, con un circuito rectificador sin filtrado podríamos comprobar cómo aparece un zumbido de baja frecuencia en la salida del altavoz.

En la Figura 11.18(a) se muestra el aspecto de una C.C. pura, tal como la proporciona una pila. En contraste, en la Figura 11.18(b) aparece una C.C. pulsatoria procedente de un rectificador de onda completa.

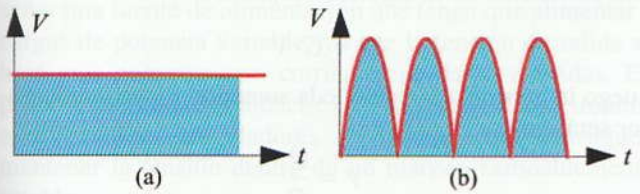


Figura 11.18. Aspecto de una corriente continua. (a) Pura. (b) Pulsatoria.

La misión de los circuitos de filtrado es la de reducir las variaciones de amplitud de la corriente y conseguir que la corriente sea lo más constante posible en la carga a alimentar. Cuando se consigue esto se dice que se ha reducido la componente de corriente alterna de la corriente de salida del rectificador o que se ha reducido el rizado.

Los circuitos de filtrado se pueden realizar con: a) un condensador, b) redes formadas por inductancias y condensadores.

11.6.1. Filtro con condensador

Para conseguir los efectos de filtrado con este sistema se conecta un condensador de gran capacidad (normalmente electrolítico) en paralelo con la salida del rectificador. Evidentemente, el rizado que aparece en la tensión de salida será mucho más acentuado en el caso del rectificador de media onda que en el de onda completa. Por esta razón, nos concentraremos en el estudio de los filtros para estos últimos rectificadores, ya que son los que tienen más aplicaciones prácticas.

Actividad experimental 11.2

Consigue un puente rectificador encapsulado, alimentalo con C.A. y conecta la salida de C.C. del mismo a una resistencia de carga.

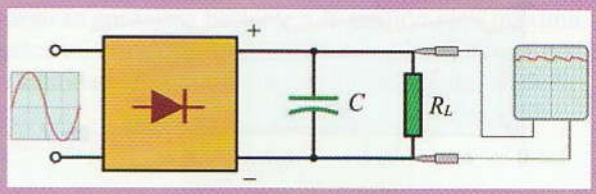


Figura 11.19. Verificación del efecto de filtrado de un condensador.

Seguidamente, mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda. A continuación, conecta un condensador de 1.000 µF en paralelo con la carga y repite la medida con el osciloscopio. Compara los resultados obtenidos en ambos casos (Figura 11.19).

Habrás podido comprobar que la tensión que aparece ahora en la pantalla del osciloscopio ya no posee tantas ondulaciones y que el valor medio de la tensión de salida ha aumentado.

Repite esta misma experiencia sustituyendo el puente rectificador de onda completa por uno de media onda. ¿Qué diferencias aprecias en la forma de la tensión de salida con respecto al anterior?

El aspecto que tiene la tensión de salida en un circuito rectificador de onda completa con condensador de filtrado es como el que se muestra en la Figura 11.20.

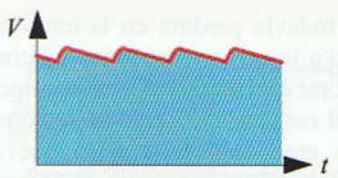


Figura 11.20. Tensión de salida de un rectificador con condensador de filtro.

Para poder explicar cómo actúa el condensador en el filtrado, en la Figura 11.21 se muestra la tensión de salida del filtro en superposición con la tensión de rectificación de onda completa aplicada a la entrada de dicho filtro.

0 a t_1 → el rectificador conduce y se carga el condensador.

t_1 a t_2 → el condensador se descarga y deja de conducir el rectificador.

t_2 a t_3 → el rectificador conduce y se carga el condensador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

t_3 a t_4 → el condensador se descarga y deja de conducir el rectificador.

t_4 a t_5 → etc.

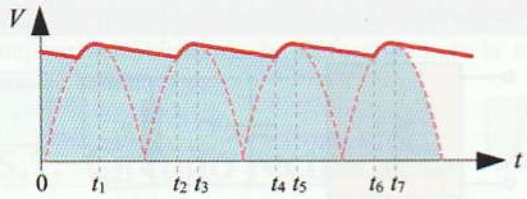


Figura 11.21. Tiempos de carga y descarga del condensador de filtro.

El funcionamiento de este filtro es como sigue:

En el primer instante (0 a t_1), los diodos del rectificador se polarizan directamente y el condensador se carga de energía mientras la tensión aplicada a sus bornes vaya en aumento. Una vez superada la tensión máxima (t_1) y mientras la tensión desciende de valor, los diodos del rectificador se polarizan inversamente, ya que la tensión con que ha quedado cargado el condensador es algo superior a la aplicada a éstos. En consecuencia, los diodos dejan de conducir (t_1 a t_2) y el condensador descarga la energía acumulada por la resistencia de carga R_L.

Este fenómeno se repite continuamente en cada uno de los ciclos de tensión pulsatoria de salida del rectificador, manteniendo así la tensión en la carga a un valor más constante.

Cuanto más constante sea la tensión de salida, más calidad de C.C. poseerá la tensión rectificada. Se dice, entonces, que se reduce su rizado.

El rizado que todavía perdura en la tensión de salida del filtro es debido a la carga y descarga del condensador. Un modo de aminorar el rizado consiste en aumentar el tiempo de descarga del condensador, lo cual se consigue con condensadores de gran capacidad o lo que es lo mismo, aumentando la constante de tiempo de descarga, la cual está en función del producto de $R_L C$.

El rizado

A las variaciones de tensión que aparecen en la salida del filtro se las denomina **tensión de rizado**. La tensión de rizado se debe a las sucesivas cargas y descargas del condensador. Según la Figura 11.22 la tensión de rizado será igual a la diferencia de las tensiones $V_1 - V_2$ y es V_1 el valor más alto de la tensión de salida y además corresponde con el valor instantáneo de la tensión a la que comienza a descargarse el condensador (t_1) y V_2 el valor más bajo de dicha tensión y se corresponde con el valor instantáneo de la tensión a la que termina la descarga del condensador (t_2).

$$V_{riz} = V_1 - V_2$$

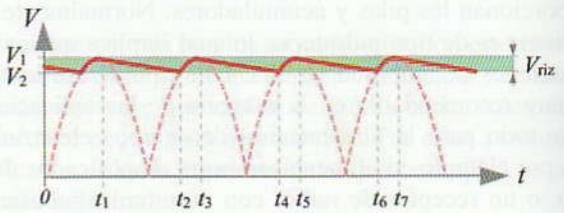


Figura 11.22. Tensión de rizado.

Para establecer una relación matemática entre la tensión de rizado y la capacidad del condensador procederemos de la siguiente forma:

La cantidad de electricidad que almacena un condensador está en función de la siguiente expresión:

$$Q = C \cdot V$$

Luego la tensión a la que queda sometido dicho condensador será igual a:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Según esta expresión la tensión de rizado será igual a:

$$V_{riz} = V_1 - V_2 = \frac{Q_1}{C} - \frac{Q_2}{C} = \frac{Q_1 - Q_2}{C}$$

Si ahora dividimos las dos partes de esta expresión por el tiempo que invierte el condensador en descargarse, es decir:

$t_1 - t_2$, tendremos:

$$\frac{V_{riz}}{t_1 - t_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{C(t_1 - t_2)}$$

En la mayor parte de las aplicaciones, el tiempo de descarga del condensador es tan amplio que se aproxima al período de la tensión pulsante de salida, por lo que se puede decir con una cierta aproximación que $T = t_1 - t_2$ y la expresión queda ahora:

$$\frac{V_{riz}}{T} = \frac{Q_1 - Q_2}{CT}$$

El término $(Q_1 - Q_2)/T$ equivale con bastante aproximación al valor medio de la corriente por la carga. Como además el inverso del período es la frecuencia, tendremos que:

$$f \cdot V_{riz} = \frac{I}{C}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Por último, despejando V_{riz} obtenemos la expresión definitiva:

$$V_{riz} = \frac{I}{fC}$$

V_{riz} = Tensión de rizado en voltios.

I = Corriente de C.C. por la carga en amperios.

f = Frecuencia del rizado en hertzios.

C = capacidad del condensador en faradios.

Esta expresión nos indica que es posible reducir la tensión de rizado con condensadores de gran capacidad. Por otro lado, también nos indica que, según aumenta la corriente por la carga, al ser más rápidas las descargas del condensador, la tensión de rizado aumenta, disminuyendo, por tanto, el valor medio de la tensión de salida de la fuente de alimentación.

Esta última apreciación es muy importante a la hora de diseñar una fuente de alimentación que tenga que alimentar a cargas de potencia variable, ya que la tensión de salida se hará más pequeña para corrientes de carga elevadas. En posteriores unidades didácticas estudiaremos los circuitos estabilizadores (reguladores de tensión) que consiguen mantener la tensión dentro de un margen razonablemente estable.

Actividad resuelta 11.5

Determina la tensión de rizado de un puente rectificador al que se le alimenta con C.A. de la red a 50 Hz, si al conectar un condensador electrolítico de 600 µF circula por la carga una corriente de 100 mA.

Solución: Dado que se trata de un rectificador de onda completa, la frecuencia de rizado será el doble que la de la alimentación de C.A., es decir, 100 Hz.

$$V_{riz} = \frac{I}{fC} = \frac{0{,}1}{100 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 1{,}67 \text{ V}$$

Para un rectificador de media onda la frecuencia de rizado coincide con la de la red. En este caso serían 50 Hz.

Actividad propuesta 11.3

¿Cuál sería la tensión de rizado que le correspondería al equipo de rectificación de la Actividad resuelta 11.5, si sustituimos el puente rectificador por un diodo rectificador de media onda?

$$V_{riz} = \cdots = 3{,}34 \text{ V}$$

Por lo general, se diseña el condensador para conseguir una tensión de rizado correspondiente al 10% de la tensión pico máxima.

Por último indicar que, cuando se utilizan condensadores de alta capacidad, el valor medio de la tensión de C.C. en la carga se aproxima bastante a la tensión pico máxima. En la práctica, para determinar este valor bastará con restar a esta cantidad la mitad de la tensión de rizado, es decir:

$$V_{CC} = V_{máx} - \frac{V_{riz}}{2}$$

Actividad resuelta 11.6

Determina la tensión de C.C. en la carga de un rectificador con filtro por condensador, si la tensión máxima en la salida es de 12 V.

Solución: Aplicando la regla de diseño del 10%, la tensión de rizado será el 10% de la tensión máxima:

$$V_{riz} = 12 \cdot \frac{10}{100} = 1{,}2 \text{ V}$$

$$V_{CC} = V_{máx} - \frac{V_{riz}}{2} = 12 - \frac{1{,}2}{2} = 11{,}4 \text{ V}$$

Actividad resuelta 11.7

En la Figura 11.23 se muestra un puente rectificador con filtro por condensador. Diseña el condensador de filtrado siguiendo la regla del 10%. Determina también la tensión de C.C. en la carga, la tensión de rizado, así como la corriente por la carga.

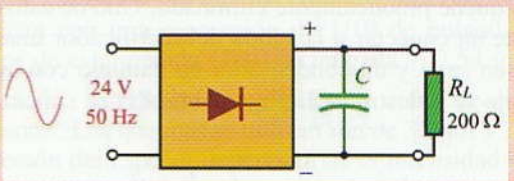


Figura 11.23.

Solución: La tensión pico máxima de la C.A. aplicada al puente es:

$$V_{máx} = V \cdot \sqrt{2} = 24 \cdot \sqrt{2} = 33{,}94 \text{ V}$$

La tensión de rizado será el 10% de esta cantidad:

$$V_{riz} = V_{máx} \frac{10}{100} = 33{,}94 \frac{10}{100} = 3{,}39 \text{ V}$$

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Para determinar la tensión de C.C. en la carga sustraeremos a la tensión pico máxima el valor correspondiente a la mitad de la tensión de rizado. Para ser más exactos también podemos sustraer la caída de tensión de los diodos, que en este caso será de 1,4 V.

$$V_{CC} = V_{máx} - \frac{V_{riz}}{2} - 1{,}4\ \text{V} = 33{,}94 - \frac{3{,}39}{2} - 1{,}4 = 30{,}85\ \text{V}$$

Para esta tensión, la corriente por la carga será:

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{30{,}85}{200} = 0{,}15\ \text{A}$$

Para determinar la capacidad del condensador, aplicamos la expresión conocida y despejamos C:

$$V_{riz} = \frac{I}{fC} \rightarrow C = \frac{I}{fV_{riz}} = \frac{0{,}15}{100 \cdot 3{,}39} =$$

$$= 442 \cdot 10^{-6}\ \text{F} = 442\ \mu\text{F}$$

Rediseña el condensador de filtrado de la Actividad resuelta 11.5, si la tensión eficaz aplicada al puente es de 9 V.

11.6.2. Filtros con inductancias y condensadores

Dado que el filtro por condensador todavía presenta en su salida una pequeña tensión de rizado, se han desarrollado otros tipos de filtros más complejos para conseguir que el rizado quede prácticamente eliminado. Uno de estos filtros consiste en conectar a la salida del rectificador una inductancia en serie y un condensador en paralelo con la carga, tal como se muestra en la Figura 11.24.

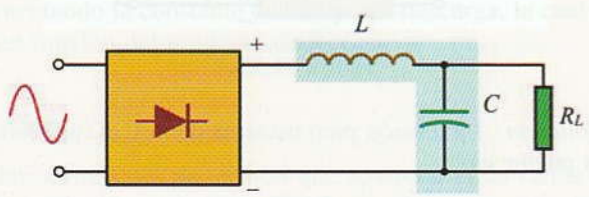


Figura 11.24. Filtro con bobina y condensador.

El efecto que produce la bobina, al estar en serie con la carga, es el de reducir la tensión de rizado a valores prácticamente despreciables, por lo que se obtiene una tensión de C.C. en la salida muy similar a la que producen las pilas y baterías. La explicación de este fenómeno es la siguiente: al pasar la corriente por la bobina, ésta se opone a las variaciones de corriente debido al efecto de la autoinducción, provocando una caída de tensión en la componente de C.A., que corresponde a la tensión de rizado. El efecto combinado de la inductancia y el condensador dan como resultado una tensión sin apenas rizado.

Un filtro con inductancias muy conocido es el *filtro pi*, como el que se muestra en la Figura 11.25. El nombre proviene de la forma que adquiere el esquema del circuito, ya que recuerda a la letra griega pi (π). Este tipo de filtros consigue mejorar sensiblemente la calidad de la tensión de C.C.

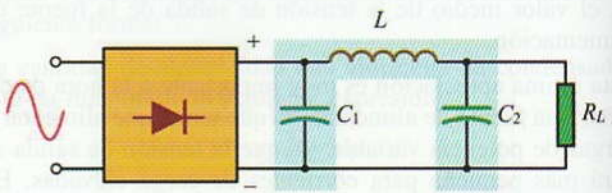


Figura 11.25. Filtro pi con bobina y condensadores.

Este tipo de filtros fue empleado hace unos años por su gran efectividad en la reducción del rizado. Sin embargo, presentan algunos inconvenientes, como un gran tamaño, un considerable peso y ser poco económicos, lo que los hace útiles sólo en aquellas aplicaciones donde se necesite suministrar grandes potencias.

En la actualidad, para fuentes de alimentación de pequeñas tensiones, los filtros con inductancias se han sustituido por reguladores de tensión integrados, los cuales consiguen reducir el rizado y proporcionan en su salida una tensión de C.C. prácticamente constante. En posteriores unidades didácticas estudiaremos este tipo de circuitos.

Con el conjunto de contenidos estudiados en esta unidad didáctica, ya nos podemos hacer a la idea de lo que es capaz de conseguir una fuente de alimentación. No obstante, ampliaremos algunas ideas más sobre estos equipos en posteriores unidades didácticas, donde se estudiará el concepto de regulación de una fuente de alimentación con el diodo Zener. Además, se estudiarán otros tipos de fuentes de alimentación más comerciales, como pueden ser: fuentes estabilizadas construidas con diodos Zener y transistores, fuentes estabilizadas con reguladores de tensión integrados que incluyen la posibilidad de ajustar la tensión en la salida y las fuentes conmutadas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.7 Construcción del circuito impreso y montaje de sus componentes

Antes de pasar a las actividades, donde vamos a proponer el diseño y montaje en una placa de circuito impreso de un circuito rectificador de onda completa con filtro por condensador, vamos a estudiar los procedimientos para su construcción y montaje.

Hasta ahora hemos realizado el montaje de nuestras actividades en el entrenador didáctico. En la práctica, se utilizan circuitos impresos como el de la Figura 11.26.

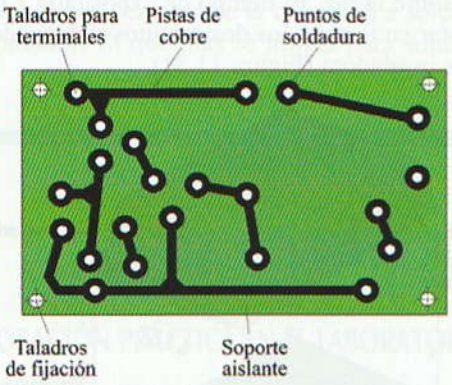


Figura 11.26. Circuito impreso visto por la cara de las pistas de cobre.

El circuito impreso está formado por una placa base de material aislante (donde se sitúan los componentes electrónicos) en la que se adhiere una fina lámina de cobre (donde se conectan los componentes una vez formadas las pistas de conexión) (Figura 11.27).

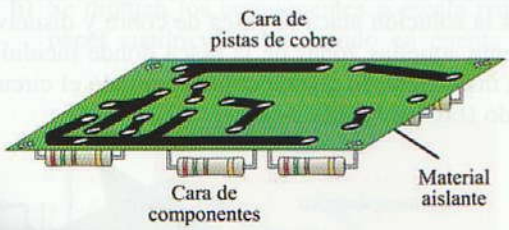


Figura 11.27. Partes de un circuito impreso.

Existen diversas técnicas para conseguir un circuito impreso como el de la Figura 11.26, donde se ha disgregado la lámina de cobre en pistas de conexión y se han realizado taladros para la conexión de los terminales de los componentes. Ahora bien, todas tienen algo en común:

- Hay que hacer un diseño previo de la ubicación y forma de las pistas de cobre y los taladros.
- Hay que conseguir eliminar de la lámina de cobre el material que no va a formar parte de las pistas de cobre de conexión.

11.7.1. Diseño de los circuitos impresos

En cuanto al diseño del circuito impreso, hoy en día existen multitud de programas de diseño asistido por ordenador, como el «Orcad» o el «Workbench Mutisim», en los cuales basta con realizar el esquema eléctrico para conseguir obtener un diseño del circuito impreso como el de la Figura 11.26.

Para realizar este diseño de forma manual nos podemos valer de una hoja de papel cuadriculado en décimas de pulgada como el que se muestra en la Figura 11.28.

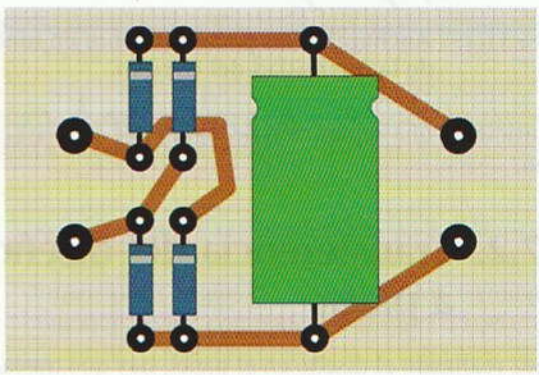


Figura 11.28. Diseño de circuito impreso con hoja de papel cuadriculado.

Hay que tener en cuenta que los componentes electrónicos se fabrican con una separación de 1/10 de pulgada o en múltiplos de esta medida (1/10 de pulgada = 2,54 mm).

En la práctica se fabrican las láminas de cobre de diferentes espesores. Las que más se utilizan son de 35 µm y 70 µm. La selección del espesor dependerá de la intensidad de corriente que vaya a fluir por las pistas de cobre.

En el diseño también es importante la selección del ancho de pista más adecuado. Éste dependerá también de la intensidad de corriente que fluya por ellas. El gráfico mostrado en la Figura 11.29 nos ayudará a la selección del ancho de pista más adecuado para una temperatura ambiente de 20 °C.

Así, por ejemplo, para una corriente de 3 A en un circuito impreso de 35 µm de espesor la anchura mínima a utilizar será de 1 mm.

La distancia a la que habrán de separarse las pistas de cobre en el diseño va a depender de la tensión entre ellas,

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

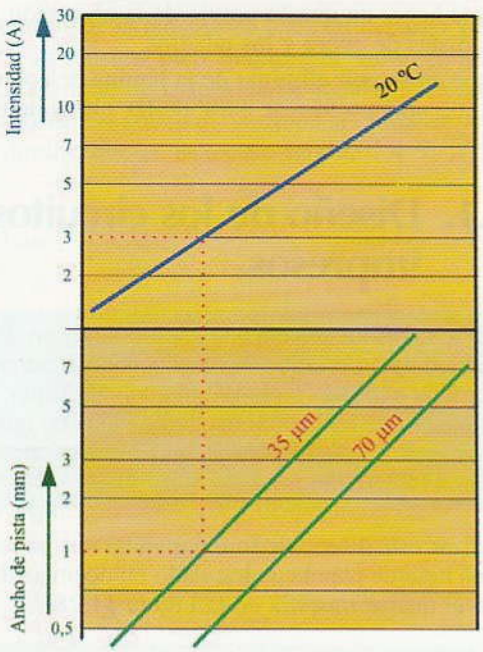


Figura 11.29. Anchura de las pistas de cobre en función de la intensidad del circuito.

y es suficiente una separación de 1 mm por cada 100 V de tensión.

11.7.2. Transferencia del diseño a placa

Una vez realizado el diseño en el papel, hay que trasladarlo a la placa de cobre del circuito impreso. Para lo cual existen diversas técnicas:

Manual: Consiste en dibujar, con un rotulador de tinta resistente al ácido, el circuito diseñado en la lámina de cobre. Para eliminar el cobre sobrante y que no está protegido con el rotulador, se sumerge la placa en una solución corrosiva, como por ejemplo cloruro férrico disuelto en agua (unos 500 gramos por cada litro de agua). En unos minutos tendremos el resultado perseguido.

Fotográfico: Con este procedimiento podemos realizar circuitos mucho más complejos, sobre todo, los que se diseñan con programas informáticos. Las placas que se utilizan con este procedimiento deben ser sensibles a la luz (placas para positivos o placas para negativos). El sistema sigue un proceso muy similar al de la fotografía:

- Primero se obtiene nuestro diseño dibujado en un papel vegetal o directamente desde el ordenador se imprime en una hoja de papel de plástico transparente (acetato).
- Para trasladar nuestro diseño a nuestra placa de positivos, se desprende la protección plástica que lleva incorporada nuestra placa virgen y se sujeta nuestro diseño en papel transparente a ésta (Figura 11.30).

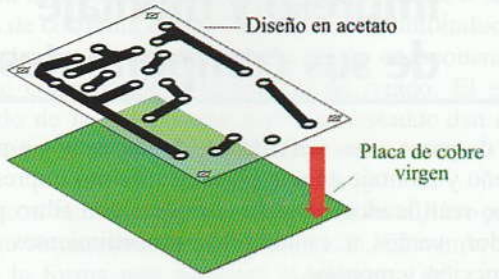


Figura 11.30. Positivo sobre placa.

- Posteriormente se introduce la placa en una insoladora (caja hermética con un conjunto de fluorescentes de luz ultravioleta), procurando que la placa sensible de cobre quede sobre la luz. El tiempo de exposición a la luz viene a estar en torno a los dos minutos y depende del modelo de insoladora (Figura 11.31).

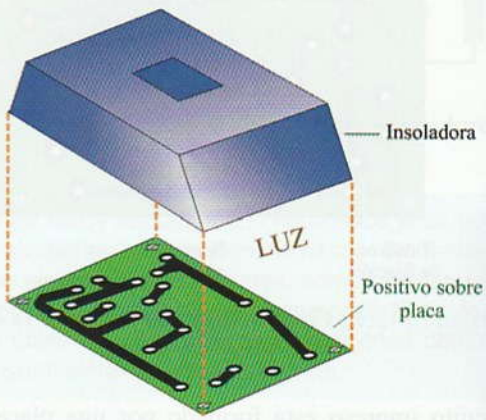


Figura 11.31. Insolado de la placa.

- Por último, se procede al revelado de la placa. Para ello, se introduce la placa en una solución de sosa cáustica cuya concentración nos indica el fabricante (unas cuatro cucharadas de café por cada litro de agua). En unos minutos la solución ataca la placa de cobre y disuelve únicamente aquellas zonas de la placa donde incidió la luz de la insoladora, lo que da como resultado el circuito diseñado (Figura 11.32).

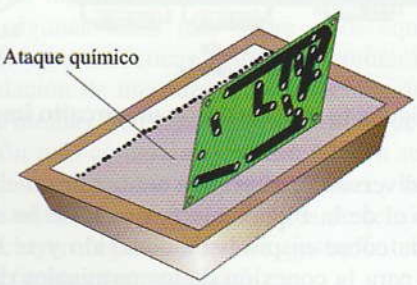


Figura 11.32. Revelado de la placa.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.7.3. Soldadura y montaje de componentes

Para unir eléctricamente los terminales de los componentes a los puntos de soldadura del circuito impreso se utiliza la soldadura blanda a partir del estaño. Esta soldadura se realiza a temperaturas relativamente bajas (por debajo de 200 °C) con el fin de no dañar los componentes o las pistas de cobre del circuito impreso.

El material que se aporta en la soldadura está formado por un hilo compuesto de una aleación de estaño-plomo. El interior del hilo está relleno de un núcleo de una sustancia resinosa que, al fundirse, consigue limpiar la zona a soldar y facilita que el estaño penetre y se difunda con facilidad entre las dos partes a soldar.

Para elevar la temperatura de la conexión a soldar, se utiliza el soldador. El que más se utiliza para soldaduras en circuitos impresos es el recto tipo lápiz (Figura 11.33) con una punta de 2 a 3 mm de diámetro y potencia de 30 a 40 W. Lo ideal es utilizar soldadores de temperatura controlada para evitar sobrecalentamientos en los componentes.

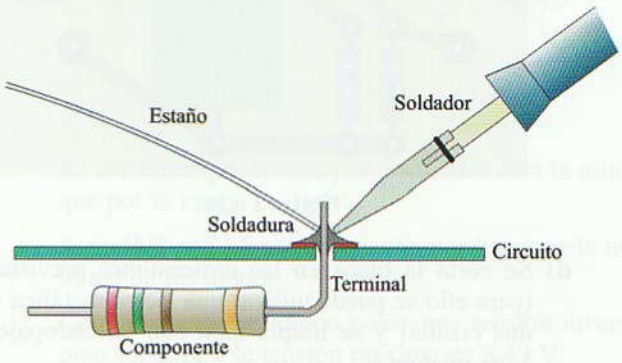


Figura 11.33. Proceso de soldadura.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

11.1 Diseño y montaje de un rectificador de onda completa en circuito impreso. Vamos a montar el circuito rectificador de media onda con filtro por condensador que se propone en el esquema de la Figura 11.34.

a) Se toman las medidas de los componentes correspondientes al circuito a montar, para lo cual se puede consultar en las especificaciones técnicas que los fabricantes nos facilitan.

b) Se dibujan los componentes a escala real en un papel cuadriculado, teniendo en cuenta que su posición relativa sea la adecuada para posteriormente facilitar las conexiones. Los puntos de soldadura se dimensionan según la sección de los terminales de conexión de los componentes (Figura 11.35).

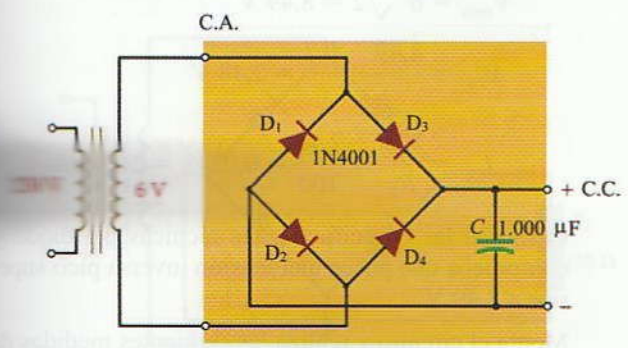


Figura 11.34.

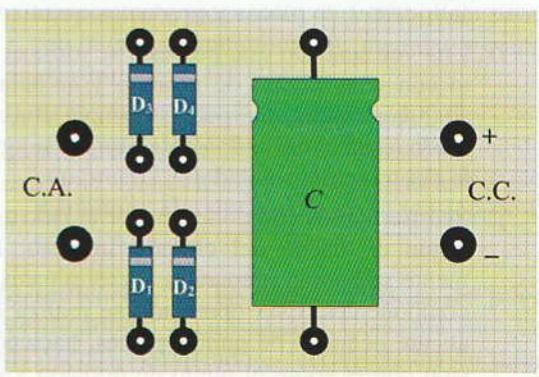


Figura 11.35.

c) A continuación se dibujan las pistas de cobre, de tal forma que conecten adecuadamente los componentes según el esquema de conexiones (Figura 11.36). Dado que no hay problemas de espacio, se ha optado por trazar pistas de algo más de 1 mm. A la hora de trazar pistas con cambios de dirección, conviene suavizar los ángulos muy agudos.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

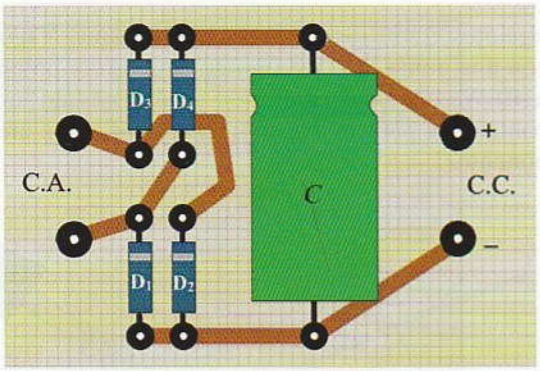


Figura 11.36.

d) Se corta la placa en las dimensiones previstas (para ello se puede utilizar una sierra metálica o una cizalla) y se limpia bien con un estropajo, agua y jabón.

e) Se fija el diseño de nuestro circuito sobre la placa de cobre y con un punzón y un martillo perforamos el papel y marcamos los puntos de soldadura.

f) Se taladran los puntos de soldadura según las dimensiones previstas.

g) Se dibujan las pistas con un rotulador de tinta indeleble siguiendo nuestro diseño. Conviene manipular con cuidado la placa de cobre, evitando tocarla con los dedos. De esta forma prevenimos que se manche de grasa.

h) Se sumerge la placa en la solución corrosiva, siguiendo las recomendaciones que facilitan los fabricantes de placas y productos químicos.

i) Una vez acabado este proceso, se toma el circuito con unas pinzas de plástico y se aclara con abundante agua. Después se limpia con agua y jabón (o alcohol) hasta que no quede ningún resto del trazo del rotulador.

j) Se insertan los componentes por el lado aislante, según el diseño del circuito impreso. Previamente se habrán preparado los terminales de los componentes. Esta operación se realiza con un alicate pequeño de puntas planas, haciendo presión con él sobre el punto de doblado y desplazando con la mano el extremo del terminal. Así evitamos realizar una presión excesiva sobre el cuerpo del componente, que podría dañarse. Además, conviene practicar el doblado del terminal a una distancia suficiente entre él y el cuerpo del componente para que no se desprenda.

k) Se sueldan los terminales a los puntos de soldadura. Para ello ten en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Comprobar el estado de limpieza del soldador. De no ser suficiente, limpiarlo con una esponja humedecida en agua. De la misma forma, también conviene comprobar que las partes a soldar estén libres de óxidos o grasas.
- Una vez caliente el soldador, aplica la punta del mismo a las dos partes a soldar simultáneamente durante un instante. Seguidamente, apoyar, el extremo del hilo de estaño al punto de unión hasta conseguir que el estaño fluya por la unión de una forma uniforme y suficiente.
- La soldadura obtenida debe presentar un aspecto limpio y brillante. Si se observa algún tipo de cristalización o granulado, habrá sido por no haber aplicado el soldador durante el tiempo suficiente, o bien por haber movido el terminal soldado antes de su total enfriamiento. En el caso de obtenerse un color gris mate, habrá sido por haber sobrecalentado la unión, lo que tampoco es recomendable.

11.2 Estudio de un rectificador de media onda. Vamos a montar con ayuda de un entrenador didáctico el circuito de la Figura 11.37. La resistencia de carga de 100 Ω actuará como receptor de la C.C. obtenida en la etapa final por la fuente de alimentación. El diodo a utilizar podría ser el 1N4001, que, según las características facilitadas por el fabricante, posee una intensidad nominal de 1 A.

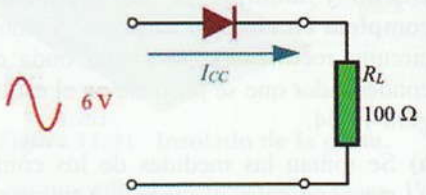


Figura 11.37.

Calcularemos la corriente por el diodo para comprobar que es inferior a la nominal:

$$V_{máx} = 6 \cdot \sqrt{2} = 8{,}49 \text{ V}$$

$$V_{CC} = \frac{8{,}49 - 0{,}7}{\pi} = 2{,}48 \text{ V}$$

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{2{,}48}{100} = 0{,}0248 = 24{,}8 \text{ mA}$$

Consigue las especificaciones técnicas del diodo y comprueba que posee una tensión inversa pico superior a 8,49 V.

Monta el circuito y realiza las siguientes medidas de comprobación:

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

a) Con el polímetro, mide la corriente por el diodo (A), la tensión alterna de entrada al circuito de rectificación (V_1), así como la tensión continua en el diodo (V_2) y en la resistencia de carga (V_3) (Figura 11.38).

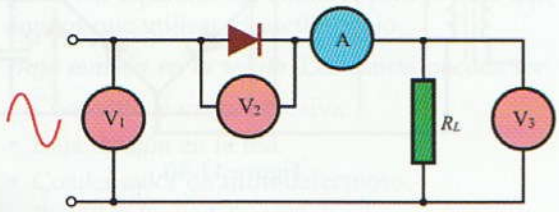


Figura 11.38.

Con los resultados obtenidos, comprueba las relaciones calculadas con anterioridad.

b) Mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda y sacando consecuencias de los tiempos de conducción del diodo.

c) Conecta un condensador electrolítico de 100 µF, cuidando de realizar las conexiones con su correspondiente polaridad y volver a repetir las medidas.

Habrás podido comprobar que la tensión que aparece ahora en la pantalla del osciloscopio ya no posee tantas ondulaciones y que el valor medio de la tensión de salida ha aumentado.

Seguidamente conecta un condensador de 1.000 µF y compara los resultados de las medidas en los diferentes casos.

11.3 Estudio de un puente rectificador. Vamos a montar con ayuda del entrenador didáctico el circuito de rectificación en puente de la Figura 11.39. La resistencia de carga de 100 Ω actuará como receptor del C.C. cedida en la etapa final por la fuente de alimentación. El diodo a utilizar podría ser, también en este caso, el 1N4001.

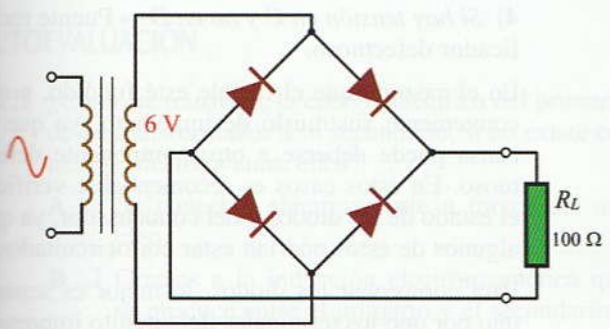


Figura 11.39.

Calcularemos la corriente por el diodo para comprobar que es inferior a la nominal (1 A):

$$V_{máx} = 6 \cdot \sqrt{2} = 8{,}49 \text{ V}$$

$$V_{CC} = 2\,\frac{V_{máx} - 1{,}4}{\pi} = 2\,\frac{8{,}49 - 1{,}4}{\pi} = 4{,}5 \text{ V}$$

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{4{,}5}{100} = 0{,}045 = 45 \text{ mA}$$

La corriente que circula por los diodos será la mitad que por la carga, es decir:

$I_D = 45/2 = 22{,}5$ mA, corriente más baja que la nominal de los diodos.

Comprueba que el diodo posee una tensión inversa pico superior a la tensión máxima de 8,49 V.

Monta el circuito de la Figura 11.39 y realiza las siguientes medidas de comprobación:

a) Con el polímetro: mide la corriente por un diodo, la corriente por la resistencia de carga, la tensión alterna de entrada al circuito de rectificación, así como la tensión continua en la resistencia de carga. Con los resultados obtenidos, comprueba las relaciones calculadas con anterioridad.

b) Mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda y comparando los resultados obtenidos con el rectificador de media onda.

c) Conecta un condensador de 1.000 µF en paralelo con la carga, repite todas las medidas y compara los resultados.

d) Retira la resistencia de carga de 100 Ω y conecta ahora una carga de 10 Ω. Repite las medidas y comprueba cómo aumenta la tensión de rizado y disminuye el valor medio de la tensión de C.C. en la carga.

11.4 Identificación de las características de puentes rectificadores encapsulados. Consigue unos cuantos puentes rectificadores encapsulados de diferentes tipos, identifica su referencia y, con ayuda de las especificaciones técnicas que facilitan los fabricantes de los mismos, obtén sus características más relevantes.

De los puentes identificados ¿cuál sería el más adecuado para la realización de la actividad anterior?

Con los circuitos aquí montados, podemos alimentar con C.C. a cualquier aparato electrónico que funcione a la tensión V_{CC}, obtenida en la salida de dichos

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

circuitos. Por supuesto, la resistencia de carga habrá que eliminarla previamente, ya que su función es sólo simular el aparato que realmente deseamos alimentar.

El aparato a que nos estamos refiriendo podría ser un receptor de radio, un cargador de baterías, un equipo de sonido, etc. Todo es cuestión de calcular y dimensionar las características que deben poseer los componentes integrantes del circuito rectificador en función de la tensión y potencia del aparato a alimentar.

11.5 Localización de las averías en una fuente de alimentación. Se trata de que detectes y repares alguna de las averías que hayan podido surgir en las fuentes de alimentación montadas en las actividades anteriores.

La localización de las averías y su posterior reparación es un ejercicio muy importante que hay que ir desarrollando y dominando paulatinamente. Seguidamente exponemos algunos consejos que serán de gran utilidad para conseguir el objetivo marcado.

El proceso de localización de las averías de cualquier equipo podría ordenarse en las siguientes fases:

a) Observación de los síntomas que aparecen por un mal funcionamiento del equipo.

b) Estudio de las causas que producen tales síntomas.

c) Reducción de las posibles causas, mediante pruebas y medidas, hasta encontrar la verdadera causa de la avería.

d) Reparación o sustitución de los componentes o partes defectuosas.

Siguiendo este proceso ordenado es más fácil detectar la posible avería.

A modo de ejemplo, vamos a estudiar cuál sería el procedimiento a seguir para localizar las averías en una fuente de alimentación.

Las fuentes de alimentación, como cualquier sistema defectuoso, suelen presentar síntomas muy concretos. Para definirlos, hay que conocer previamente cómo se comportan normalmente.

Los síntomas que se pueden apreciar en una fuente de alimentación como la de la Figura 11.40 son:

a) Ausencia de tensión en la salida.

b) Tensión de salida baja.

c) Rizado excesivo.

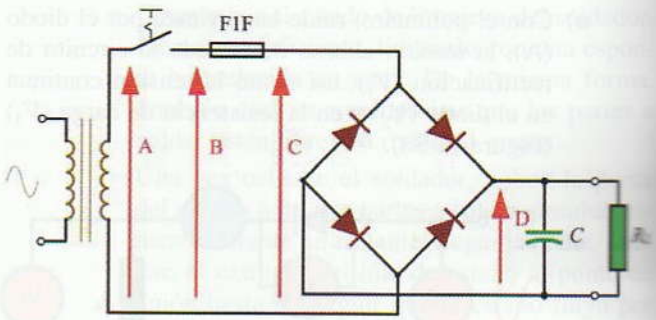


Figura 11.40.

Una vez que se han determinado los síntomas, habrá que estudiar las posibles causas de la avería.

a) ***Ausencia de tensión en la salida.*** Las causas pueden ser:

- Un fusible fundido.
- Un interruptor defectuoso.
- Conductores de alimentación o toma de corriente defectuosos.
- Un transformador defectuoso.
- Diodos abiertos.
- Condensador del filtro perforado.

Una vez hecho esto, el siguiente paso es reducir las posibilidades a una de las causas. Para ello, hay que realizar unas cuantas medidas de comprobación. En el caso del circuito mostrado en la Figura 11.40 estas medidas pueden consistir en medir la tensión que aparece en los puntos A, B, C, D y E. Pudiendo sacar de los datos obtenidos en las mediciones, las siguientes conclusiones:

1) *Tensión en A igual a cero* → Conductores de alimentación, toma de corriente o transformador defectuoso.

2) *Si hay tensión en A pero no en B* → Interruptor defectuoso.

3) *Si hay tensión en B pero no en C* → Fusible fundido.

4) *Si hay tensión en C y no en D* → Puente rectificador defectuoso.

En el caso de que el fusible esté fundido, no es conveniente sustituirlo de inmediato, ya que la causa puede deberse a otro componente defectuoso. En estos casos es recomendable verificar el estado de los diodos y del condensador, ya que algunos de estos podrían estar cortocircuitados.

Para comprobar los diodos, lo mejor es separar uno por uno los terminales del circuito impreso y verificar su resistencia interna con el óhmetro.

Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Conviene tomar unas pequeñas medidas de seguridad antes de realizar esta operación, como desconectar la alimentación de la red y comprobar que el condensador de filtrado está descargado. También se puede comprobar el estado de un diodo sin separarlo del circuito, para lo cual tendremos que utilizar el osciloscopio.

b) ***Baja tensión en la salida***. Las causas pueden ser:

- Corriente de carga excesiva.
- Baja tensión en la red.
- Condensador de filtro defectuoso.
- Rectificadores defectuosos.

Las dos últimas causas pueden consistir en la pérdida de capacidad del condensador o diodos defectuosos.

c) ***Rizado excesivo***. Puede estar motivado por los condensadores de filtros defectuosos.

Recambio de los componentes defectuosos

Una vez que se han localizado los componentes defectuosos, hay que sustituirlos por otros. Lo más recomendable es sustituirlos por recambios exactos, aunque si no se dispone de ellos se puede recurrir a los equivalentes.

Estos equivalentes deben poseer, al menos, las mismas características nominales que los originales. No se podrá sustituir, por ejemplo, una resistencia de 1 W por una de 1/2 W, ya que con el tiempo acabaría por destruirse.

También es muy importante que los recambios equivalentes posean las mismas dimensiones, ya que en caso contrario no podrían encajar correctamente en el circuito impreso.

Las guías de equivalentes de semiconductores son muy útiles para encontrar los recambios adecuados. Se puede decir que el repuesto más seguro es aquel que posee los mismos valores nominales y dimensiones que el componente al que sustituye.

AUTOEVALUACIÓN

11.1 ¿Cómo se transfiere la energía eléctrica del primario de un transformador a su secundario, si no existe conexión eléctrica entre ellos?

A ❑ Se conectan eléctricamente a través del núcleo.

B ❑ Gracias a la inducción electromagnética que se produce entre el primario y el secundario.

C ❑ Gracias al efecto Joule entre los bobinados.

11.2 ¿Qué rectificador consigue una menor tensión de rizado a iguales condiciones de filtrado?

A ❑ El rectificador de onda completa.

B ❑ El rectificador de media onda.

C ❑ El puente rectificador.

11.3 Determina la relación de transformación de un transformador que posee 500 espiras en su primario y 150 en su secundario. ¿Cuál será la tensión que aparecerá en su secundario, si le aplicamos 200 V en el primario?

11.4 El valor eficaz de la tensión alterna a la entrada a un rectificador de media onda es de 17 V. ¿Cuál será la lectura de un voltímetro de continua conectado a la salida?

11.5 El valor máximo de la tensión alterna de entrada a un puente de rectificadores es de 100 V. ¿Cuál será la lectura de un voltímetro de continua conectado a la salida?

11.6 Encuentra la corriente nominal de los diodos de silicio, así como su tensión inversa pico máxima, para los diferentes tipos de circuitos rectificadores: a) rectificador de media onda, b) rectificador de onda completa con transformador de toma intermedia, c) puente rectificador. Las características a las que se someten dichos circuitos rectificadores son en todos los casos: tensión eficaz en el secundario del transformador = 24 V, resistencia de la carga = = 100 Ω. Determina también la tensión y la corriente por la carga en cada uno de los casos. Por último, dibuja los esquemas eléctricos correspondientes a cada uno de los circuitos indicados.

11.7 Se quiere determinar cuál de los diodos que se exponen en la Tabla 11.1 será el más adecuado para utilizarlo en un rectificador de media onda de las siguientes características: tensión eficaz alterna de entrada igual a 50 V, resistencia de la carga igual a 500 Ω.

Tabla 11.1.

Diodo	V de ruptura	$I_{máx}$
1N914	75 V	200 mA
1N1185	120 V	35 A
1N4001	50 V	1 A

11.8 ¿Y para un puente rectificador al que se le aplica 30 V de tensión alterna de entrada y se le conecta una resistencia de carga de 25 Ω?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

11.9 A un puente rectificador, con filtro por condensador, se le aplica una tensión senoidal de 50 Hz y 12 V. Diseña el condensador de filtrado siguiendo la regla del 10% para una carga de 100 Ω. Determina también la tensión de C.C. en la carga, la tensión de rizado, así como la corriente por la carga.

11.10 A un puente rectificador, con filtro por condensador, se le aplica una tensión alterna senoidal de 50 Hz y 24 V. Averigua la tensión de rizado, así como su porcentaje respecto a la tensión de C.C. (*factor de rizado*) si la resistencia de carga es de 240 Ω y la capacidad del condensador 500 μF.

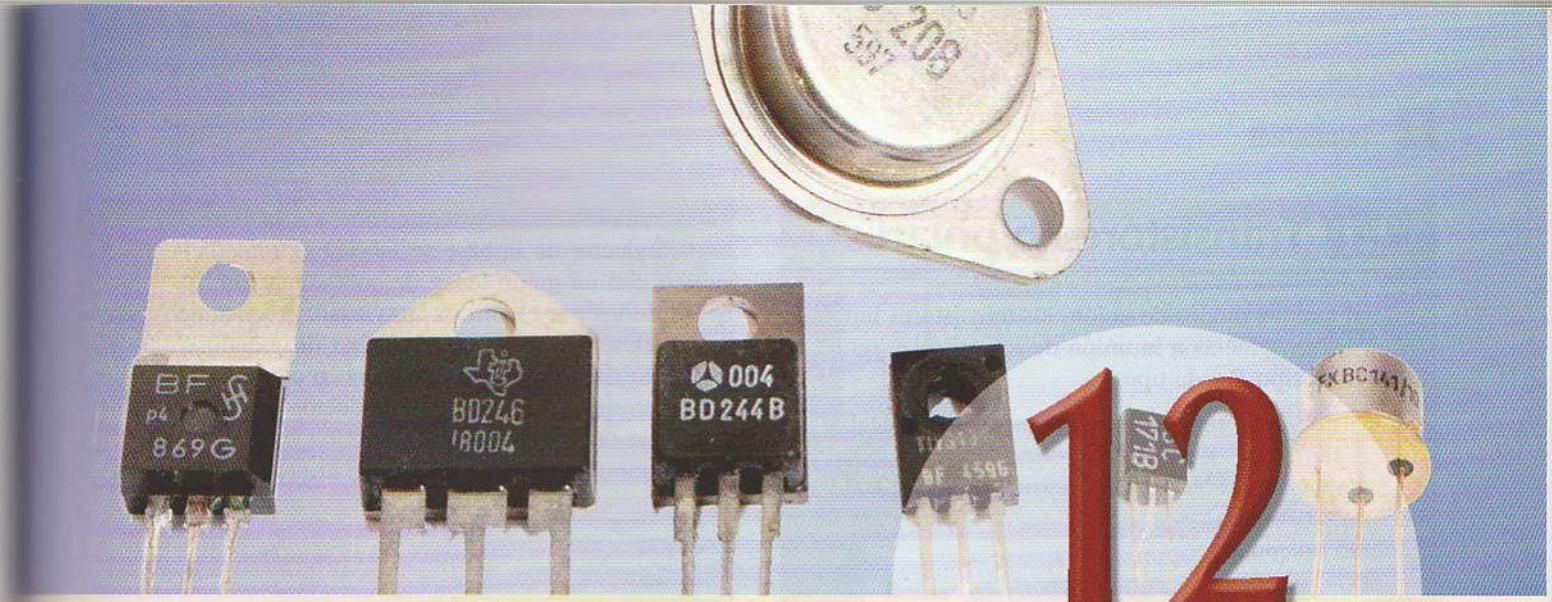
AMPLIACIÓN

11.1 Consigue algún programa para el diseño y la simulación de circuitos, como el Workbench o el Orcad y aprende a realizar tus propios diseños de algún circuito electrónico básico.

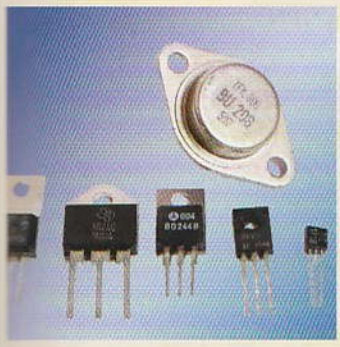
11.2 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, busca un fabricante de puentes de diodos para circuitos electrónicos y analiza las características de los diferentes tipos fabricados.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



12 Transistores



Los transistores son fundamentales en la mayoría de los circuitos electrónicos que realizan la función de amplificación, control, estabilización de la tensión, etc. Hay que pensar que los dispositivos electrónicos que generan las señales de control, como una resistencia NTC en un termostato, una LDR en una barrera fotoeléctrica, un micrófono de audio, etc., producen señales eléctricas muy débiles que, en la mayor parte de las aplicaciones, hay que aumentar (proceso de amplificación) para poder conseguir alimentar a dispositivos o receptores, que necesitan de un aporte mayor de energía para su funcionamiento (altavoces, tubos de rayos catódicos, relés que ponen en marcha una lámpara o motor, etc.).

Antes de descubrirse el transistor (1950), los circuitos electrónicos estaban construidos con válvulas de vacío. Éstas eran muy voluminosas y necesitaban para su funcionamiento de una resistencia de caldeo, que provocaba un consumo de energía excesivo y acortaba la vida de las mismas.

El invento del primer transistor por Schockley dio paso a una nueva era. A partir del transistor bipolar, se han ido desarrollando otro tipo de transistores, como el transistor de efecto de campo FET y el transistor de campo de óxido metálico MOSFET que por sus especiales características les hace ideales para el tratamiento de señales de radiofrecuencia y en el diseño de circuitos digitales. Con ellos también se han desarrollado los circuitos integrados "chips", que reúnen en un solo componente multitud de transistores de todo tipo, diodos, resistencias, etc., consiguiendo miniaturizar y simplificar enormemente los circuitos. Los circuitos integrados consiguen realizar múltiples funciones con un solo componente, como las que realiza el microprocesador de un ordenador.

Contenido

12.1. Transistores bipolares
12.2. Funcionamiento del transistor
12.3. Identificación de transistores
12.4. Comprobación del estado de un transistor
12.5. Intensidades de corriente en el transistor
12.6. Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor
12.7. Tensiones de ruptura
12.8. Características de los transistores bipolares
12.9. Polarización del transistor
12.10. Fototransistores
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los transistores.
- Describir las curvas características más representativas de los transistores, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- Interpretar los parámetros fundamentales que aparecen en las hojas técnicas de los fabricantes de transistores.
- Describir los circuitos de polarización del transistor.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

12.1 Transistores bipolares

Al igual que los diodos de unión, los transistores bipolares se construyen gracias a la unión de los cristales semiconductores de tipo *P* y de tipo *N*.

El transistor es un componente fácilmente identificable por sus tres terminales de conexión que asoman al exterior a través de una de las bases de su cápsula (Figura 12.1) Estos suelen estar dispuestos en línea o según los vértices de un triángulo imaginario.

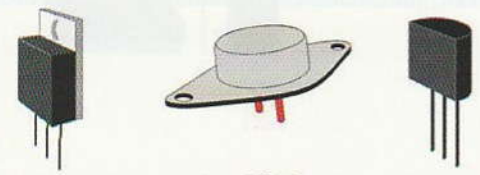


Figura 12.1. Aspectos de transistores con diferentes encapsulados.

Cada uno de estos terminales está unido a un cristal semiconductor de tipo *P* o tipo *N*. De esta forma, nos encontramos con un terminal de emisor, un terminal de base y otro de colector.

Existen dos tipos de transistores, los PNP y los NPN. En la Figura 12.2 se muestra la disposición de los cristales en cada uno de los tipos, así como su símbolo correspondiente. Obsérvese que si el transistor es PNP (**P**e**N**etra) la flecha correspondiente al emisor se dibuja hacia dentro y si es NPN (**N**o **P**e**N**etra) dicha flecha se dibuja hacia fuera.

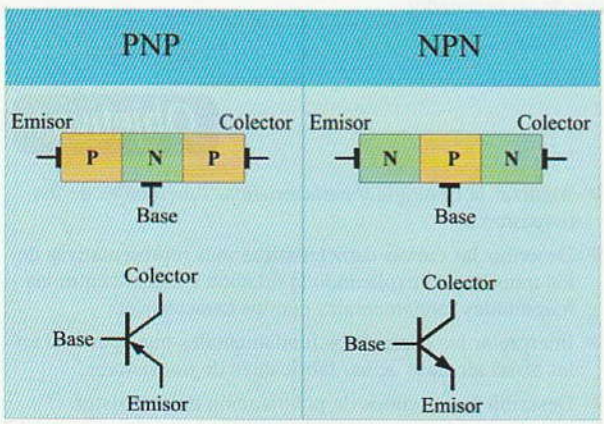


Figura 12.2. Transistores NPN y PNP.

En el proceso de fabricación de un transistor NPN, se hace que el cristal semiconductor correspondiente al emisor esté muy contaminado, por lo que contendrá un exceso de portadores de carga; su tarea consistirá en enviar o emitir estos portadores de carga (electrones) a la base. El cristal semiconductor de la base se fabrica extremadamente delgado y con un grado tenue de contaminación; los electrones emitidos por el emisor atraviesan, prácticamente en su totalidad, a este cristal, para acabar dirigiéndose al colector. La misión de la base consistirá en controlar dicho flujo de electrones. El cristal semiconductor del colector se fabrica con un grado de contaminación intermedio y recibe este nombre por recoger los electrones enviados por el emisor.

12.2 Funcionamiento del transistor

Para estudiar el funcionamiento del transistor, nos vamos a referir exclusivamente al tipo NPN.

Actividad experimental 12.1

a) Localiza un transistor NPN en el compartimiento de componentes del entrenador didáctico, por ejemplo el SC 107 y monta el circuito de la Figura 12.3 mediante un diodo LED conectado en serie con una resistencia de 470 Ω y alimenta el conjunto por una pila o fuente de alimentación de 9 V.

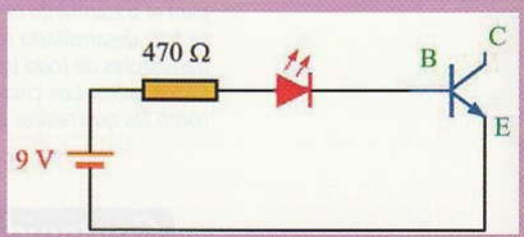


Figura 12.3.

Al probar el circuito, el diodo LED se tendrá que encender. Veamos cuál es la explicación de este fenómeno: al conectar el polo positivo de la pila a la base (cristal tipo P) y el negativo al emisor (cristal tipo N) la unión queda polarizada directamente y, por tanto, circulará una corriente elevada a través del cristal (como si se tratase de un diodo), que hace que el LED se encienda.

b) A continuación permuta los conductores en los terminales del transistor según se indica en el esquema de la Figura 12.4. Al probar el circuito, el diodo LED no se tiene que encender.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

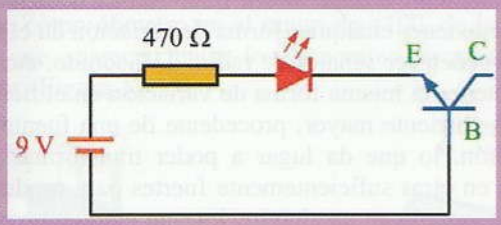


Figura 12.4.

¿Cuál es la explicación? Si se polariza la unión emisor-base PN en sentido inverso, la corriente a través del cristal será prácticamente nula y, por lo tanto, el diodo LED permanecerá apagado (Figura 12.5).

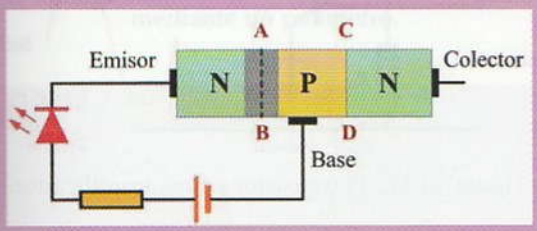


Figura 12.5.

c) Realiza a continuación las conexiones con los terminales de base y colector, tal como se indica en el esquema de la Figura 12.6 y explica por qué se enciende el diodo en este caso.

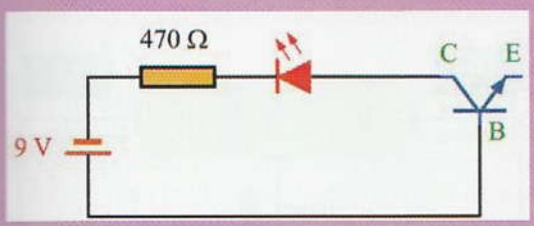


Figura 12.6.

d) Ahora permuta los conductores de la pila, de tal forma que la base quede conectada al terminal negativo y el colector al diodo LED. Dibuja el esquema de conexiones y explica por qué no se enciende el diodo LED en este caso.

e) Seguidamente, conecta los terminales del colector y emisor, tal como se muestra en la Figura 12.7. Podrás comprobar cómo en este caso el diodo LED no se enciende.

¿Cuál es la explicación? Los electrones libres del cristal N del emisor son repelidos por el polo negativo de la pila (Figura 12.8), mientras que los electrones libres del cristal N del colector son atraídos por el polo positivo. De todo esto se deduce que se produce un desplazamiento de electrones en el sentido del emisor al colector. A pesar de ello, los electrones del emisor no poseen la suficiente energía para atravesar las barreras AB y CD de las uniones, las cuales los repelen.

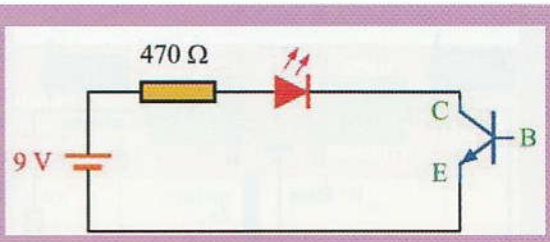


Figura 12.7.

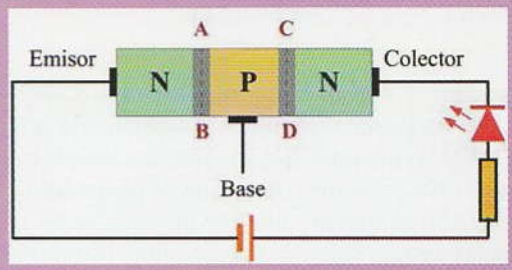


Figura 12.8.

La corriente emisor-colector es, por tanto, muy pequeña y por eso el diodo LED no se enciende, por lo que se considera a efectos prácticos como una corriente de fuga.

f) Consigue una resistencia de 1.000 Ω y una pila de 1,5 V y realiza el montaje que se propone en la Figura 12.9. Podrás comprobar cómo en este caso sí que se enciende el diodo LED.

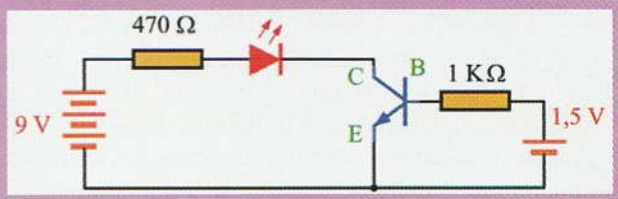


Figura 12.9.

¿Cuál es la explicación? La principal barrera que se oponía al paso de los electrones desde el emisor al colector la constituía la barrera AB (Figura 12.10), ya que una vez atravesada ésta los electrones se encuentran bajo la influencia del campo eléctrico del polo positivo.

Al aplicar una pequeña tensión positiva a la base (cristal P), con respecto al emisor (cristal N), dicha barrera

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

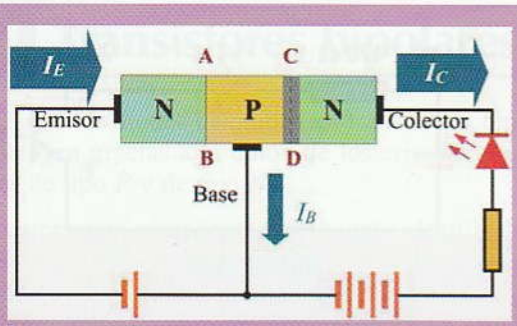


Figura 12.10.

desaparecerá, por quedar polarizada directamente la unión de los cristales PN que la componen, sintiéndose atraídos los electrones por los potenciales positivos de la base y del colector. Dado que el potencial positivo del colector es mucho más elevado que el de la base, los electrones se sentirán más atraídos por el primero, por lo que se obtiene una elevada corriente de colector I_C (que hace que el diodo LED se encienda) y una pequeña corriente de base I_B.

A esta explicación hay que añadir que, al ser el cristal de la base extremadamente delgado y estar débilmente contaminado con unos pocos huecos, la base se satura rápidamente al ser invadida por la gran cantidad de electrones provenientes del emisor, lo que causa una difusión de éstos hacia la zona de empobrecimiento de la unión con el colector. Una vez que los electrones han superado la unión, son atraídos con fuerza por el fuerte campo eléctrico positivo a que está sometido el colector.

El número de electrones que fluyen hacia el colector será más elevado cuanto mayor sea la tensión de polarización directa del diodo base-emisor. Por lo que se puede decir que esta tensión junto con la corriente de base, controlan la corriente de colector. Haciendo un símil, podríamos decir que la tensión de polarización del diodo base-emisor abre más o menos una compuerta por donde pasan los electrones; esta compuerta se consigue abrir con un pequeño esfuerzo (débil corriente de base); sin embargo, por ella pasan una gran cantidad de electrones, que se dirigen hacia el colector, debido al fuerte potencial eléctrico que éste posee.

Si tenemos en cuenta que la corriente de base es muy pequeña con respecto a la del colector y que ésta última varía en consonancia con la primera, habremos comprendido la más importante propiedad del transistor, consistente en su capacidad de amplificación de corriente.

Este fenómeno nos permitirá que, con la débil corriente que puede tener cualquier forma de variación en el tiempo, como pueden ser señales de radio, TV, sonido, etc., podamos obtener la misma forma de variación en el tiempo sobre una corriente mayor, procedente de una fuente de alimentación, lo que da lugar a poder transformar señales débiles en otras suficientemente fuertes para producir, por ejemplo, sonido en un altavoz, imagen en un televisor, etc. (Figura 12.11).

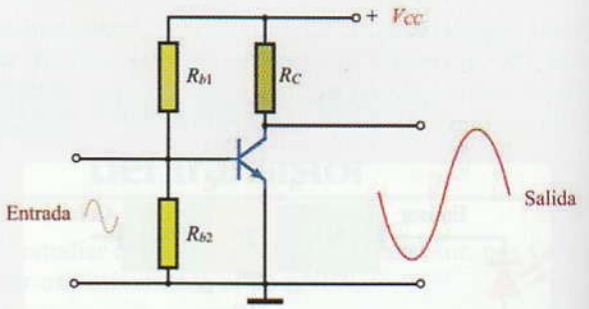


Figura 12.11. **El transistor como amplificador.**

El estudio que se ha hecho para el transistor NPN es igualmente válido para el PNP, con la única diferencia de que en el caso del transistor PNP la conducción se produce cuando se aplica una tensión negativa en el colector con respecto al emisor y una tensión igualmente negativa, aunque de inferior valor a la base, con respecto al emisor (Figura 12.12).

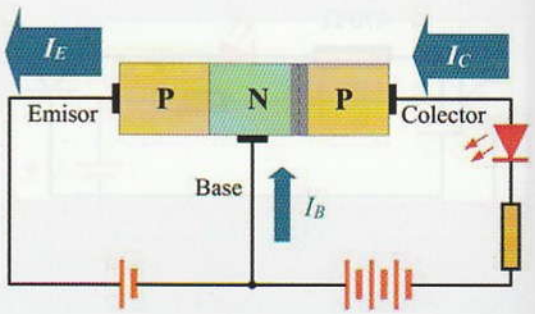


Figura 12.12. **Polarizaciones en un transistor PNP.**

12.3 Identificación de transistores

La mejor forma de identificar un transistor es anotar su referencia y, posteriormente, consultar sus características en las hojas de especificaciones técnicas del fabricante, o en un libro de características de transistores.

Mediante un método muy sencillo se puede determinar si un transistor desconocido es del tipo PNP o NPN. Este mé-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

todo consiste en tomar varias medidas, con el polímetro utilizado como óhmetro en el rango de x100, de las resistencias que aparecen entre los diferentes terminales del transistor (Figura 12.13).

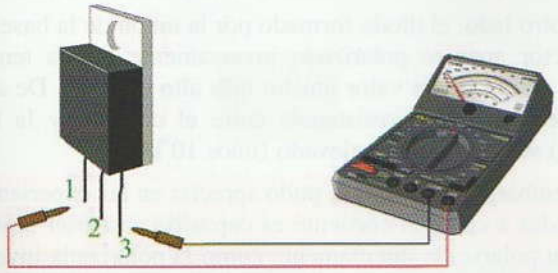


Figura 12.13. Identificación del tipo de transistor mediante un polímetro.

Actividad experimental 12.2

Toma un transistor desconocido y averigua de qué tipo es, así como la disposición de sus terminales. Seguidamente, se exponen algunas ideas para conseguirlo.

Primero determinamos cuál de los terminales del transistor corresponde a la base. Esto se consigue, midiendo la resistencia con el óhmetro entre los diferentes terminales. En un transistor en buen estado, la resistencia entre el colector y el emisor es siempre muy alta, cualquiera que sea la polaridad aplicada por el óhmetro; cuando se haga esta verificación, el otro terminal corresponderá a la base.

Una vez localizada la base, conectamos la punta de prueba positiva en ella y la negativa en cualquiera de los otros dos terminales del transistor: si la resistencia obtenida es muy baja (se ha polarizado la unión de uno de los dos diodos por efecto de la tensión positiva aplicada con el óhmetro a la base P) se trata de un transistor tipo NPN; si obtenemos una resistencia muy alta (no se ha polarizado la unión) se trata de un transistor PNP.

Por si te sirve de ayuda, en la Tabla 12.1 se indican las medidas de resistencia que se dan en cada caso para los dos tipos de transistores.

Con este sencillo procedimiento también se puede llegar a averiguar cuál de los terminales corresponde al emisor y cuál al colector. Para ello, hay que tener en cuenta que:

> La resistencia y tensión de barrera de la unión base-colector es algo menor que la correspondiente a la unión base-emisor.

Tabla 12.1.

Punta roja	Punta negra	PNP	NPN
		Medida óhmetro	Medida óhmetro
colector	emisor	R_{alta}	R_{alta}
emisor	colector	R_{alta}	R_{alta}
emisor	base	R_{baja}	R_{alta}
base	emisor	R_{alta}	R_{baja}
base	colector	R_{alta}	R_{baja}
colector	base	R_{baja}	R_{alta}

Esta diferencia es más apreciable si medimos la tensión de barrera con un polímetro digital.

12.4 Comprobación del estado de un transistor

Para comprobar si un transistor está en buen estado utilizaremos el óhmetro. Con él verificaremos la resistencia entre los terminales del transistor con las diferentes posibilidades de polarización, teniendo en cuenta que: a) con cualquier polaridad, la resistencia obtenida, al aplicar el óhmetro entre el colector y el emisor, es siempre muy alta para un transistor en buen estado; b) al polarizar directamente cualquiera de las uniones entre base-colector y base-emisor, la resistencia obtenida para un transistor en buen estado debe ser baja.

Por otro lado, los polímetros digitales suelen ir equipados con un dispositivo, llamado transistómetro, para poder conectar el transistor y así poder determinar su ganancia. Para ello dispone de dos filas de tres conexiones, una para transistores PNP y otra para NPN, tal como se muestra en la Figura 12.14.

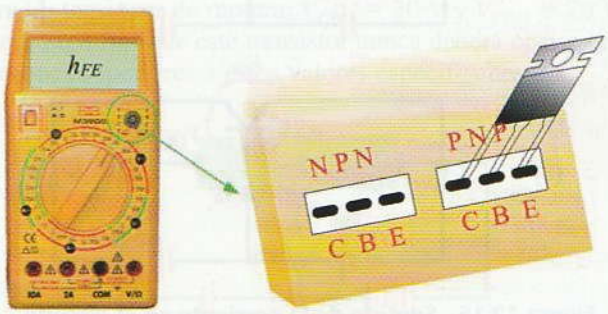


Figura 12.14. Medida de la ganancia mediante polímetro digital.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Con este dispositivo podemos medir la ganancia de un transistor una vez conectado en el apartado que le corresponde, según su tipo y en el orden de terminales correcto. Aprovechando el transistómetro, se puede verificar el estado de un transistor, ya que si éste está en buen estado tendrá que medirse una ganancia aceptable. Con este sistema también es posible comprobar la disposición de los tres terminales del transistor, ya que hasta que éste no se conecta adecuadamente al transistómetro no se mide ganancia alguna.

12.5 Intensidades de corriente en el transistor

En los apartados anteriores hemos estudiado, de una forma experimental, el funcionamiento del transistor. Completaremos a continuación algunos otros aspectos más particulares del mismo, como son la relación de intensidades de corriente que aparecen en cada uno de los terminales del transistor. Pero antes vamos a realizar un pequeño repaso de los conocimientos ya adquiridos, intentando, a su vez, dar una mayor profundidad a los mismos.

Este estudio lo realizaremos también sobre un transistor NPN. Este tipo es más utilizado que el PNP, ya que actúa algo más rápido y se adapta mejor a los sistemas donde se conecta el negativo a masa. No obstante, es fácil encontrar los dos tipos de transistores en un mismo circuito, ya que su combinación amplía las posibilidades del diseñador.

Tal como está polarizado el transistor NPN (Figura 12.15), el diodo formado por la unión del emisor y la base queda polarizado directamente con la tensión V_{BE}. Para que esto ocurra, será suficiente con una tensión mínima, superior a la umbral, que en el caso del silicio será de 0,6 V a 0,7 V. Este fenómeno de polarización directa hace que la resistencia base-emisor (R_{BE}) disminuya a un valor muy reducido (por debajo de los 100 Ω).

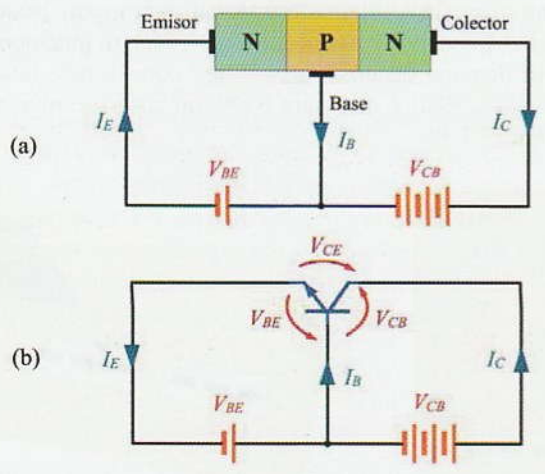


Figura 12.15. Sentido de la corriente en el circuito. (a) Según el flujo de electrones. (b) Sentido convencional de la corriente.

Por otro lado, el diodo formado por la unión de la base y el colector aparece polarizado inversamente por la tensión V_{CB}, que es de un valor mucho más alto que V_{BE}. De aquí, se deduce que la resistencia entre el colector y la base (R_{CB}) sea de un valor elevado (unos 10 kΩ).

Sin embargo, tal como se pudo apreciar en las experiencias llevadas a cabo, la corriente es capaz de atravesar tanto la unión polarizada directamente como la polarizada inversamente. De tal forma que el valor de la corriente que entra por el emisor I_E se acerca bastante a la del colector I_C, siendo la corriente que sale de la base muy pequeña.

Efectivamente, la región que ocupa la base del transistor es muy reducida y está mínimamente impurificada, por lo que posee muy pocos huecos. De esta forma, los electrones que emite el emisor superan sin dificultad la unión emisor-base, por estar polarizada directamente. Pero es probable que uno de estos electrones encuentre en la base un hueco libre con el que combinarse. Por ello, la corriente de base será muy débil. Sin embargo, estos electrones, una vez que superan la barrera de emisor-base, se sienten fuertemente atraídos por el potencial eléctrico positivo del colector, estableciéndose un valor considerable de corriente de colector I_C.

Lo normal es que el 99% de la corriente del emisor se dirija directamente al colector y que el 1% restante lo haga a la base.

Se puede establecer una ecuación que relacione estas tres corrientes, de tal forma que:

$$I_E = I_C + I_B$$

A pesar de que la corriente de base es muy débil, ésta es muy valiosa, ya que gracias a ella se puede gobernar la gran corriente que aparece en el colector. De tal forma que, si la corriente de base fuese nula, no habría corriente de colector. Téngase en cuenta que, al desaparecer la tensión de polarización de la unión emisor-base, los electrones del emisor no pueden superar esta barrera.

12.6 Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor

La circunstancia de que una pequeña corriente de base controle las corrientes de emisor y colector mucho más

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

elevadas, indica la capacidad que posee un transistor para conseguir una gran *ganancia de corriente*. Así, la ganancia de corriente de un transistor es la relación que existe entre la variación o incremento de la corriente de colector y la variación de la corriente de base.

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Actividad resuelta 12.1

En el caso de que en un transistor se obtenga una variación de corriente de colector de 8 mA y de 0,08 mA en la corriente de base, la ganancia será:

$$\beta = \frac{8}{0{,}08} = 100$$

La ganancia de corriente de los transistores comerciales varía bastante de unos a otros. Así, nos podemos encontrar transistores de potencia que poseen una β de tan sólo 20. Por otro lado, los transistores de pequeña señal pueden llegar a tener una β de 400. Por todo ello, se puede considerar que los valores normales de este parámetro se encuentran entre 50 y 300.

En las hojas de especificaciones técnicas, que facilitan los fabricantes de transistores, en vez de utilizarse β para identificar la ganancia de corriente, se suele utilizar h_{FE}. Así por ejemplo, para el transistor con referencia BC 108, se lee en sus hojas de características una h_{FE} entre 150 y 290; lo que nos indica que la ganancia de corriente de este transistor puede encontrarse entre estos valores.

La ganancia de corriente varía notablemente con la corriente de colector. Además, la temperatura ambiente influye positivamente en el aumento de dicha corriente. Hay que pensar que, al aumentar la temperatura de la unión del diodo colector, aumenta el número de portadores minoritarios y, por tanto, se produce un aumento de la corriente de colector.

12.7 Tensiones de ruptura

Al igual que ocurría con los diodos, cuando se polariza inversamente cualquiera de las uniones de un transistor, aparecen pequeñas corrientes inversas, que no provocarán la ruptura de dichas uniones, si la tensión que se aplica no supera los valores máximos fijados en las hojas de especificaciones técnicas. Se pueden dar dos casos diferentes a tener en cuenta:

Tensión inversa colector-base (V_{CBO}) con el emisor abierto: En la Figura 12.16 se ha abierto el circuito del emisor; observa cómo la unión formada por la base y el colector están polarizadas inversamente con la tensión V_{CB}. Como ocurría con los diodos, esto provoca la circulación de una pequeña corriente de fuga (I_{CBO}) que no será peligrosa hasta que no se alcance la tensión de ruptura de la unión. Normalmente esta tensión suele ser elevada (del orden de 20 a 300 V).

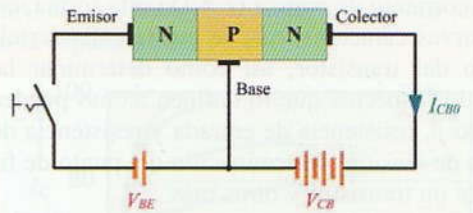


Figura 12.16. **Transistor con el emisor abierto.**

Nunca deberá trabajarse, por supuesto, con una tensión superior a la indicada por el fabricante en sus hojas técnicas.

Este dato suele aparecer indicado con las siglas V_{CBO}.

Tensión inversa colector-emisor con la base abierta: En este otro caso, se ha abierto la base y, por tanto, se aplica una tensión entre el colector y el emisor que es igual a la suma de las tensiones de las dos fuentes (Figura 12.17). Esta fuerte diferencia de potencial provoca un pequeño flujo de electrones que emite el emisor y que se sienten fuertemente atraídos por el potencial positivo de la fuente. El resultado es una pequeña corriente de fuga de emisor a colector I_{CEO}. Al igual que ocurría anteriormente, el valor de esta corriente está determinado por la tensión colector-emisor (V_{CEO}) aplicada. En las hojas técnicas también aparece la tensión máxima de funcionamiento (V_{CEO}), que en ningún caso debe ser superada, para evitar el peligro de destrucción del semiconductor.

Así por ejemplo, para el transistor BC 108, en las hojas de especificaciones técnicas aparecen los siguientes valores para las tensiones de ruptura: $V_{CBO} = 30$ V y $V_{CEO} = 20$ V, lo que significa que este transistor nunca deberá operar con tensiones superiores a estos valores especificados.

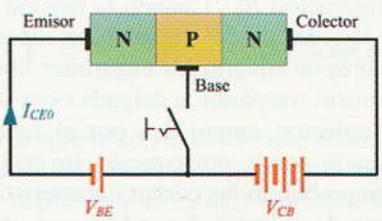


Figura 12.17. **Transistor con la base abierta.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

12.8 Características de los transistores bipolares

Las curvas características del transistor relacionan entre sí todas las magnitudes de tensión e intensidad de corriente que se dan en él, como son: la tensión colector-emisor (V_{CE}), la tensión base-emisor (V_{BE}), la tensión colector-base (V_{CB}), la corriente de base (I_B), la corriente de colector (I_C) y la corriente de emisor (I_E). De esta forma, conociendo las curvas características, se puede entender el funcionamiento del transistor, así como determinar la mayor parte de los aspectos que lo definen, como pueden ser: el parámetro β, resistencia de entrada y resistencia de salida, ganancia de tensión, determinación del punto de funcionamiento de un transistor y otras más.

12.8.1. Curvas características con el emisor común (EC)

La mayoría de los circuitos con transistores utiliza el emisor como terminal común entre la entrada y la salida, en vez de la base. En la Figura 12.18 se muestra el circuito básico con la configuración en emisor común (EC).

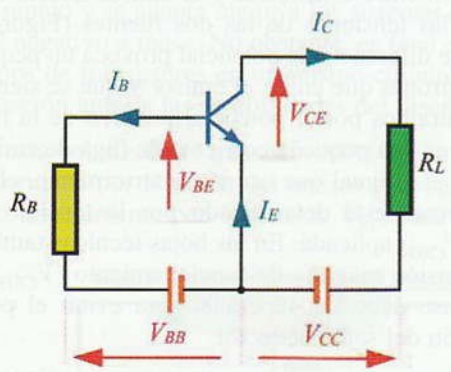


Figura 12.18. Transistor en emisor común.

Ahora la base hace de electrodo de entrada y el colector de electrodo de salida.

El funcionamiento del transistor en este circuito es similar al de la configuración *BC*. Cuando la tensión de polarización directa V_{BE} del diodo emisor-base supera los 0,7 V (para transistores de silicio), los electrones libres, que provienen del emisor, traspasan la delgada capa de la base, en dirección al colector, empujados por el fuerte potencial eléctrico causado por la polarización inversa V_{CE}. Como podremos comprobar en las curvas características, el valor de la corriente de colector dependerá casi exclusivamente de la corriente de base.

Características $I_C = f(V_{CE})$ para I_B = cte

Estas características también son conocidas como familia de colector, ya que son las correspondientes a la tensión e intensidad del colector. En la Figura 12.19 se muestra una familia de curvas de colector para diferentes valores constantes de la corriente de base.

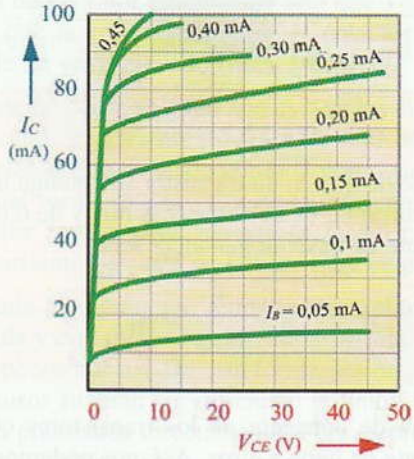


Figura 12.19. Curvas $I_C = f(V_{CE})$ para I_B constante.

Estas curvas representan, en cierto modo, la forma de funcionamiento del transistor. Se puede comprobar que, para una tensión constante de colector-emisor, si se producen pequeñas variaciones de la corriente de base (del orden de µA) se originan unas variaciones en la corriente del colector mucho más elevadas (del orden de mA). De lo cual se deduce la capacidad del transistor para amplificar corrientes.

Observa que, en la mayor parte de las curvas, la tensión V_{CE} afecta muy poco a la corriente de colector I_C. Si se aumenta V_{CE} demasiado (por encima de V_{CEO}), la unión del colector entra en la región de ruptura y éste puede llegar a destruirse. Sin embargo, si la tensión V_{CE} es muy pequeña (por debajo de 0,7 V), la corriente de colector será muy débil, obteniéndose una ganancia de corriente muy baja. En conclusión, para conseguir que el transistor trabaje como amplificador de corriente, la tensión de polarización inversa V_{CE} debe mantenerse por encima de 0,7 V y por debajo de la tensión de ruptura.

Obtención de la ganancia de corriente de un transistor a partir de las curvas características

La ganancia de corriente de un transistor se definía como la relación que se da entre la variación de la corriente de colector (ΔI_C) y la variación de corriente de base (ΔI_B). Para determinar dicha ganancia se puede recurrir a las características de colector.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 12.2

Supongamos que la curva característica de un transistor ensayado es la que se muestra en la Figura 12.20.

Para un punto de funcionamiento situado en $V_{CE} = 20$ V, según las curvas de la Figura 12.20, la intensidad de colector variará entre $I_C = 32$ mA e $I_C = 45$ mA, mientras que la intensidad de base lo hará entre $I_B = 0{,}10$ mA e $I_B = 0{,}15$ mA. La ganancia se calcula así:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{45 - 32}{0{,}15 - 0{,}1} = 260$$

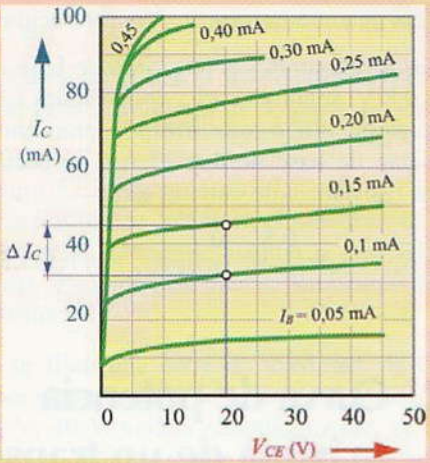


Figura 12.20.

Resistencia de salida

Se podría decir que la resistencia de salida de un transistor es la que éste presenta en los bornes de salida (Figura 12.21).

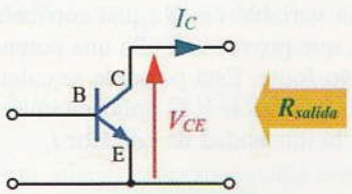


Figura 12.21. **Resistencia de salida de un transistor.**

Como para un montaje en emisor común, la tensión en la salida es V_{CE} y la corriente de salida es I_C, el valor de esta resistencia se calcula aplicando la ley de Ohm de esta forma:

$$R_S = \frac{\Delta V_{sal}}{\Delta I_{sal}} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$$

Mediante las curvas de colector será fácil determinar la resistencia de salida del transistor, ya que éstas relacionan los valores de V_{CE} con I_C. Esta resistencia adquirirá valores diferentes para cada una de las corrientes de base.

Actividad resuelta 12.3

Determina la resistencia de salida de un transistor en configuración EC para una corriente de base de 0,20 mA, si sus curvas de colector son las que se muestran en la Figura 12.22.

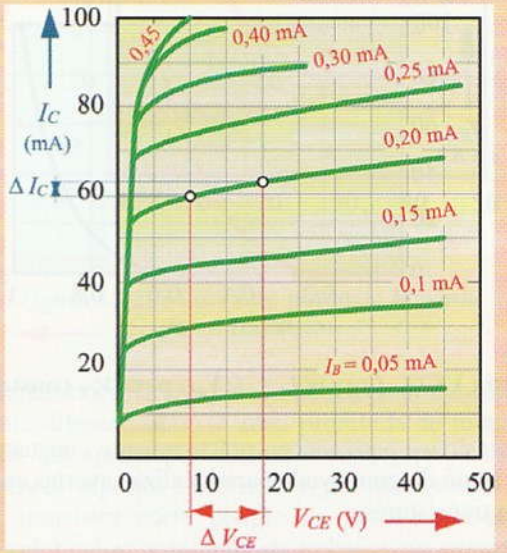


Figura 12.22.

Solución: En el caso de que en un principio el transistor reciba una tensión entre el colector y el emisor de 10 V, la corriente del colector adquirirá, según las curvas, un valor de 59 mA. Si ahora se aumenta la tensión entre el colector y el emisor hasta 20 V, sin variar la corriente de base, aparecerá una nueva corriente de colector igual a 63 mA. De esta forma, obtendremos los valores de:

$$\Delta V_{CE} = 20 - 10 = 10 \text{ V}$$

$$\Delta I_C = 59 - 63 = 4 \text{ mA} = 0{,}004 \text{ A}$$

$$R_S = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{10}{0{,}004} = 2.500\ \Omega$$

En el caso de que la corriente de base disminuyera, por ejemplo hasta 0,05 mA, ¿se produciría alguna variación en la resistencia de salida? Compruébalo tú mismo.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Característica $I_B = f(V_{BE})$ para V_{CE} = cte

Mediante esta curva podemos determinar los efectos que producen las variaciones de la tensión de polarización V_{BE} sobre la corriente de base I_B. Estas gráficas reciben el nombre de curvas características de transferencia. Las curvas que se obtienen son muy similares a la de un diodo cuando se le polariza directamente. En la Figura 12.23 se muestra la diferencia existente entre la característica de un transistor de germanio y uno de silicio. El transistor de germanio comienza a conducir cerca de los 0,2 V y el de silicio a los 0,6 V, aproximadamente.

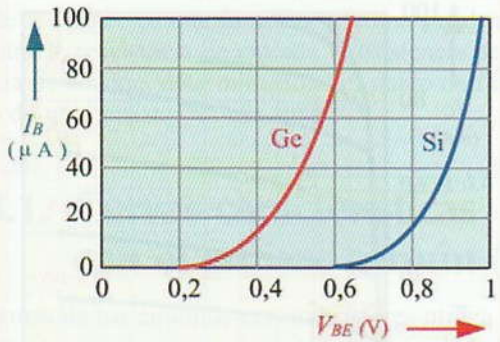


Figura 12.23. Curvas $I_B = f(V_{BE})$ para V_{CE} constante.

Estas tensiones permanecen prácticamente constantes, por lo que serán de gran ayuda para localizar averías en circuitos con transistores.

Los transistores de germanio se han ido dejando de utilizar poco a poco, dando paso a los de silicio, que son más baratos y responden mejor a las altas temperaturas. No obstante, el germanio ofrece algunas ventajas en determinadas aplicaciones.

Resistencia de entrada

Se podría decir que la resistencia de entrada de un transistor es la que éste presenta desde los bornes de entrada (Figura 12.24).

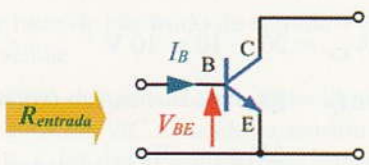


Figura 12.24. Resistencia de entrada de un transistor.

Al observar atentamente la característica de transferencia de la Figura 12.23, se puede observar que la intensidad de base aumenta con la tensión base-emisor. Pues bien, a la relación existente entre las variaciones de tensión base-emisor y las de la corriente de base, que se corresponden con la tensión y corriente de entrada, se la denomina resistencia de entrada, es decir:

$$R_e = \frac{\Delta V_{ent}}{\Delta I_{ent}} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$$

Para realizar el cálculo de la resistencia de entrada nos valdremos de la curva característica de transferencia.

Actividad resuelta 12.4

Teniendo en cuenta la característica de transferencia de la Figura 12.23, para el transistor de silicio, averigua la resistencia de entrada para una configuración en EC.

Solución: Si tomamos las tensiones de base-emisor de 0,7 V y 0,8 V, según la curva de la Figura 12.23, a los transistores de silicio les corresponderán unos valores de corriente de base de 8 y 17 μA, respectivamente. Luego la resistencia de entrada será:

$$R_e = \frac{0,8 - 0,7}{17 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6}} = 11.111\ \Omega$$

12.8.2. Curva de potencia máxima de un transistor

Una de las aplicaciones de las curvas características de un transistor es que, a partir de éstas, se pueden determinar sus límites de funcionamiento. Estos límites están determinados por la potencia máxima que puede desarrollar un transistor sin provocar su destrucción.

Veamos en qué consiste este fenómeno: el transistor posee una resistencia entre el colector y el emisor, que varía en función de la intensidad que se le aplique a su base I_B. Por esta resistencia variable circula una corriente I_C, relativamente grande, que provoca en ella una potencia calorífica, debido al efecto Joule. Esta potencia se calcula realizando el producto de la tensión V_{CE}, aplicada entre el colector y el emisor, por la intensidad de colector I_C.

$$P = V_{CE} \cdot I_C$$

Como esta potencia se transforma íntegramente en calor, provoca un aumento de la temperatura en el transistor que, en el caso de salirse de los límites admisibles, provocará la destrucción de éste.

La potencia máxima de trabajo de un transistor es un dato que proporcionan los fabricantes en las hojas de especificaciones técnicas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 12.5

Supongamos que poseemos un transistor con una potencia máxima de 600 mW.

Con este dato se puede trazar una curva de potencia máxima sobre la familia de curvas de colector, para así poder determinar para qué tensión de colector-emisor y corriente de colector es posible trabajar con el transistor sin que se deteriore.

De esta forma, para no superar los valores límite en nuestro ejemplo se deberá cumplir en todo momento la expresión:

$$P_{máx} = V_{CE} \cdot I_C = 600 \text{ mW} = 0{,}6 \text{ W}$$

Luego la curva de potencia máxima para este transistor será tal que el producto de V_{CE} por I_C sea igual a 0,6 W.

En la Figura 12.25 se muestran las curvas correspondientes a la familia de colector del transistor de nuestro ejemplo, y en las que se ha añadido la curva de potencia máxima. Para trazarla, se ha procedido de la siguiente forma:

Primero, se fijan una serie de tensiones de colector-emisor; por ejemplo: 0 V, 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 25 V, 30 V, 35 V, 40 V y 45 V. Seguidamente, se calculan las corrientes máximas que podrán circular por el colector para cada una de estas tensiones, sin que se sobrepase la potencia máxima de 0,6 W. Los diferentes valores de I_C vendrán dados por la fórmula:

$$I_C = \frac{P_{máx}}{V_{CE}}$$

De esta forma tendremos que:

Para $V_{CE} = 0$ V, $I_C = \frac{0{,}6}{0} = \infty$ A

Para $V_{CE} = 5$ V, $I_C = \frac{0{,}6}{5} = 0{,}120$ A $= 120$ mA

Siguiendo este mismo proceso, podrás comprobar que aparecen las siguientes parejas de valores:

V_{CE} (V)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
I_C (mA)	∞	120	60	40	30	24	20	17	15	13

Una vez hecho esto, se llevan los valores obtenidos a la familia de curvas de colector, formando el resultado de la unión de los puntos una hipérbola como la que se muestra en la Figura 12.25.

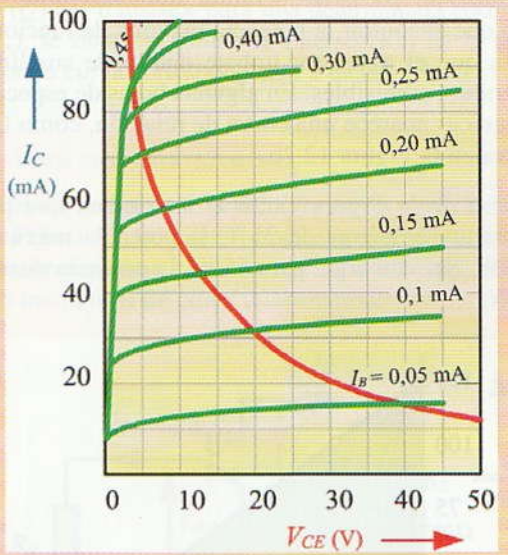


Figura 12.25. **Curva de potencia máxima de un transistor.**

Esta hipérbola divide la característica en dos zonas claramente diferenciadas: la zona prohibida de funcionamiento, que queda por encima de ella y en la cual la potencia es superior a 600 mW y, por tanto, es ahí donde el transistor corre peligro de destrucción por la acción del calor; y la zona de trabajo, que queda por debajo de la hipérbola y en la cual la potencia es inferior a 600 mW.

Influencia de la temperatura ambiente en la potencia máxima de un transistor

La potencia máxima que un transistor puede disipar en forma de calor, depende de la temperatura máxima permitida en la unión del colector T_J (máx). Esta temperatura nunca debe ser superada, ya que a partir de ella se puede destruir el transistor. Este dato aparece en las hojas de características del componente. Así, por ejemplo, el transistor BC 107 posee una T_J (máx) de 175 °C.

La potencia máxima a que puede trabajar un transistor también depende de la temperatura ambiente. Hay que tener en cuenta que el calor producido en las uniones se conduce a través del encapsulado del transistor y se disipa al aire que lo rodea. Cuanto mayor sea la temperatura de este aire (temperatura ambiente), peor será la ventilación del transistor y, por lo tanto, menor la potencia máxima que se le puede exigir.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Por lo general, en las hojas técnicas se indica la potencia máxima para una temperatura ambiente de 25 °C.

En el caso de que la temperatura ambiente fuese superior, habría que encontrar la potencia máxima de funcionamiento para que el transistor trabaje dentro de sus límites de temperatura admisibles. En algunas hojas de especificaciones técnicas aparece una curva de relación, como la que se muestra en la Figura 12.26.

La curva de la Figura 12.26(a) nos indica que para una temperatura ambiente de 25 °C la potencia máxima es de 125 mW. Sin embargo, para 55 °C, la potencia disminuye a 50 mW.

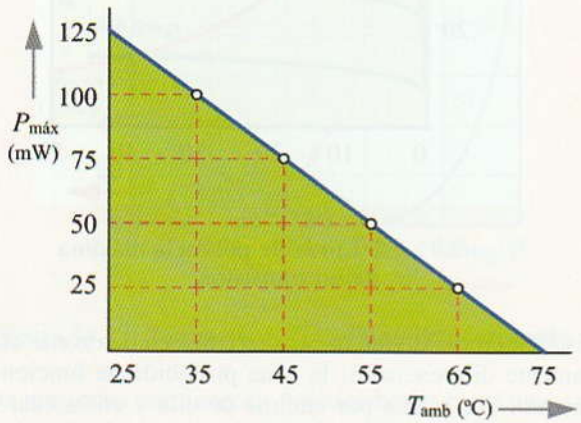


Figura 12.26 Relación de la potencia máxima de un transistor con la temperatura ambiente.

Aletas de refrigeración

En el caso de que se desee aumentar la potencia de un transistor, se puede acoplar un disipador de calor, o aleta de refrigeración en la superficie de la cápsula. De esta forma se consigue que el calor se evacúe con mayor facilidad hacia el aire exterior. En otras ocasiones se une, mediante tornillos, la cápsula del transistor con el chasis, que en este caso actúa como disipador de calor, por tener una gran superficie (Figura 12.27).

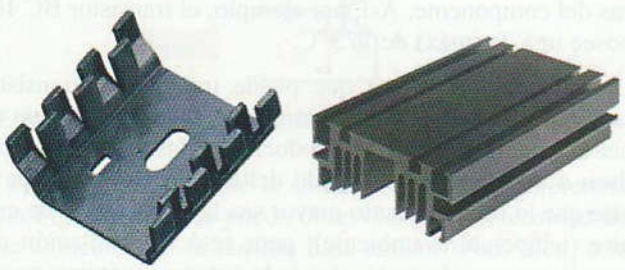


Figura 12.27. Aletas de refrigeración.

12.8.3. Recta de carga de un transistor

En apartados anteriores hemos estudiado el comportamiento de un transistor en todas sus posibilidades de funcionamiento mediante las curvas características. Pero, ¿cómo se comportaría éste en el caso de que trabaje con una determinada resistencia de carga R_L? La solución está en trazar una línea de carga en las curvas de colector para poder determinar los puntos de funcionamiento.

En la Figura 12.28 se muestra un transistor NPN en configuración de emisor común. Para determinar la corriente que circula por el colector, podemos aplicar la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia de carga R_L. La tensión aplicada a esta resistencia se corresponderá con la tensión total aplicada por la fuente V_{CC} menos la caída de tensión que se produce entre el colector y el emisor V_{CE}. De esta manera obtendremos la siguiente expresión, que se corresponderá con la ecuación de la recta de carga:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L}$$

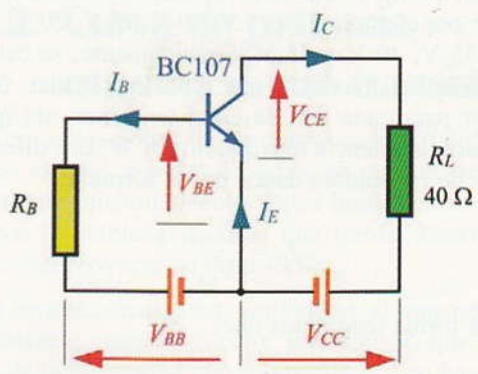


Figura 12.28. Transistor NPN en emisor común.

Para dibujar esta recta sobre la curva característica, tal como se muestra en la Figura 12.29, lo primero que hay que hacer es encontrar sus extremos ($I_C = 0$ y $V_{CE} = 0$):

$$\text{Para } V_{CE} = 0, \quad I_C = \frac{V_{CC} - 0}{R_L} \rightarrow I_C = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

$$\text{Para } I_C = 0, \quad 0 = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_L} \rightarrow V_{CE} = V_{CC}$$

Llevando estos valores a las curvas características de colector, obtenemos la recta de carga de la Figura 12.29 para una determinada resistencia de carga R_L y una tensión de fuente V_{CC}.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

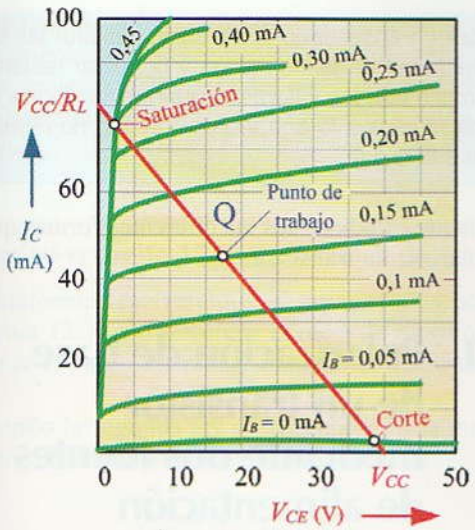


Figura 12.29. Recta de carga de un transistor.

A lo largo de la recta de carga se pueden distinguir tres partes fundamentales: punto de corte, punto de saturación, punto de trabajo.

El punto de corte es donde la línea de carga corta a la curva correspondiente a la corriente de base igual a cero ($I_B = 0$). Dada la escasa polarización directa a que queda sometido el diodo de emisor-base, la corriente que aparece por el colector es prácticamente nula (sólo circula una pequeñísima corriente de fuga I_{CEO}). Haciendo una aproximación, se puede decir, sin equivocarse mucho, que el punto de corte se da en la intersección de la recta de carga con el eje horizontal, es decir, cuando:

$$V_{CE\,\text{corte}} \cong V_{CC}$$

El punto de saturación aparece donde la línea de carga corta a la intensidad de base de saturación (véase la Figura 12.29). En este punto la corriente de colector es la máxima que se puede dar para la operación del transistor, dentro de los límites de la recta de carga. Haciendo una aproximación, se puede decir que el punto de saturación aparece en la intersección de la recta de carga con el eje vertical, es decir, cuando:

$$I_{C\,\text{saturación}} \cong \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Para corrientes de base superiores a la de saturación se produce también el efecto de saturación en el transistor.

El punto de trabajo es aquel en donde el transistor trabaja de una forma normal y que, normalmente, se encuentra entre la zona de corte y saturación. Para determinar el punto de trabajo (Q) del transistor para una determinada corriente de base (I_B), se busca el punto de intersección de la recta de carga con la curva correspondiente a dicha corriente de base.

Actividad resuelta 12.6

Se trata de determinar la recta de carga para el circuito de la Figura 12.30 y determinar el punto de trabajo del transistor para una corriente de base de 0,15 mA, así como los puntos de corte y saturación.

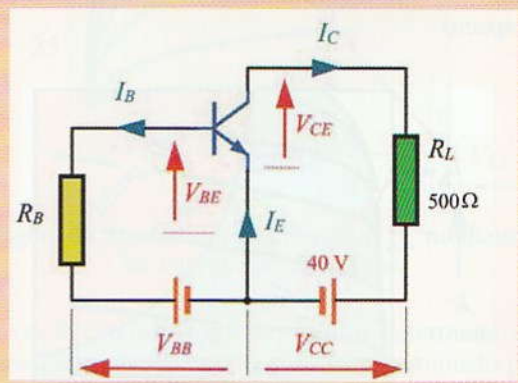


Figura 12.30.

Solución: Suponiendo que la familia de curvas de colector del transistor es la que se expone en la Figura 12.29, el punto de corte de la línea de carga con el eje horizontal ($I_C = 0$) vendrá determinado por:

$$V_{CE} = V_{CC} = 40 \text{ V}$$

El punto de corte de la línea de carga con el eje vertical ($V_{CC} = 0$) será entonces:

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{40}{500} = 0{,}080 \text{ A} = 80 \text{ mA}$$

Llevando estos valores a las curvas de la Figura 12.29, dibujamos la línea de carga.

El punto Q de trabajo del transistor para una corriente de base de 0,15 mA será el que determine la intersección de la recta de carga con la curva de dicha corriente, habiendo resultado los siguientes valores ($I_C = 45$ mA, $V_{CE} = 17$ V).

El punto de corte (el transistor se comporta como un interruptor abierto, $I_C \approx 0$) se da cuando la tensión de colector-emisor es de 40 V.

El punto de saturación del transistor (cuando se llega a este extremo de funcionamiento el transistor se com-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

porta como un interruptor cerrado, con lo que no responde en ningún caso a las variaciones de la corriente de base; I_C = máx) se da cuando la corriente de colector es 80 mA y la corriente de base es superior a 0,45 mA.

Por último, hay que indicar que cuando se diseña un circuito para un transistor hay que procurar que el transistor nunca opere por encima de la curva de potencia máxima. Esto se consigue seleccionando valores adecuados de la tensión de fuente V_{CC} y de la resistencia de carga R_I, de tal forma que la recta de carga trazada con éstos esté siempre por debajo de la curva de potencia máxima. En la Figura 12.31 se muestra un ejemplo al respecto.

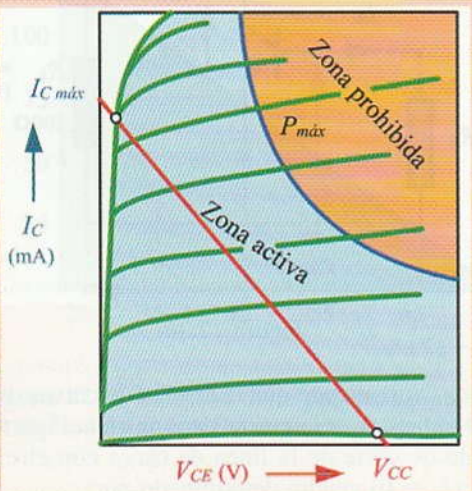


Figura 12.31. **Zona de trabajo del transistor.**

Actividad propuesta 12.1

¿Cómo sería la recta de carga, el punto de trabajo del transistor y los puntos de corte y saturación de la Actividad resuelta 12.6, si la resistencia de carga pasa a ser 250 Ω y la corriente de base 0,1 mA?

12.9 Polarización del transistor

Para conseguir que un transistor funcione adecuadamente, dentro de los límites indicados en el diseño, es preciso polarizarlo correctamente.

Polarizar un transistor consiste en suministrar las tensiones adecuadas de alimentación y conectar resistencias en el circuito con los valores oportunos, de forma que la señal introducida a la entrada del circuito no resulte deformada a la salida.

Seguidamente estudiaremos las diferentes formas que existen de polarizar un transistor.

12.9.1. Polarización de base de un transistor mediante dos fuentes de alimentación

En la Figura 12.32 se muestra el ejemplo de un transistor NPN con polarización mediante dos fuentes de alimentación.

Aquí se ha conectado el transistor en configuración emisor común. La tensión V_{BB} que proporciona la fuente de 1,5 V polariza directamente la unión base-emisor a través de la resistencia de polarización R_B. Por otro lado, la fuente de 4 V proporciona la tensión V_{CC} que polariza inversamente el colector a través de la resistencia R_C. El objetivo que se persigue es determinar los valores de la resistencia R_C y los de la resistencia R_B para que la polarización del transistor sea correcta, o sea, para que la forma de señal introducida a la entrada del circuito no resulte deformada a su salida.

En un amplificador la señal de entrada suele ser de carácter variable, por ejemplo, la señal eléctrica de un micrófono o la aguja de un tocadiscos.

El condensador C_1 de la Figura 12.32 sirve para acoplar la entrada al transistor. Este condensador elimina la componente de corriente continua que pudiera aparecer en la señal de entrada.

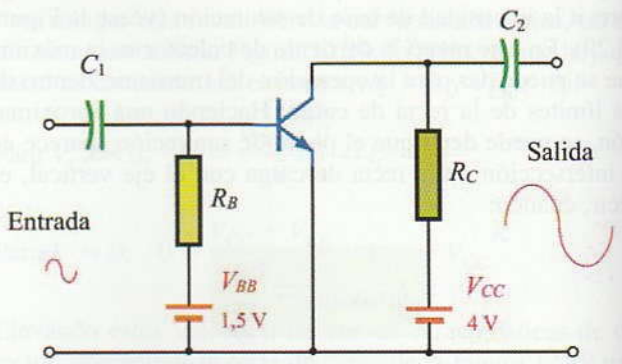


Figura 12.32. **Polarización de transistor NPN mediante dos fuentes de alimentación.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La resistencia de polarización de base R_B se elige de forma que la corriente de base sea pequeña y de un valor determinado. La resistencia de carga del colector hace posible que entre el colector y el emisor aparezca una tensión variable en la salida.

Actividad resuelta 12.7

Seguidamente resolveremos el circuito presentado en la Figura 12.32 y trazaremos la recta de carga para determinar el punto de trabajo idóneo del transistor.

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff en la malla del colector obtendremos la siguiente ecuación:

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE}$$

Para determinar los puntos de intersección de la recta de carga con los ejes de coordenadas de V_{CE} e I_C de las curvas características de colector, se procede como en otras ocasiones:

Para $I_C = 0 \rightarrow V_{CE\,máx} = V_{CC}$ (punto de corte)

Para $V_{CE} = 0 \rightarrow I_{C\,máx} = \dfrac{V_{CC}}{R_C}$ (punto de saturación)

Para el circuito que se mostró como ejemplo en la Figura 12.32, el punto de corte de la recta de carga se da para el valor de $V_{CE} = V_{CC} = 4$ V.

Para encontrar el valor adecuado de $I_{C\,máx}$ habrá que observar las curvas características de colector del transistor, que se corresponden con las indicadas en la Figura 12.33, de tal forma que la recta de carga a trazar no sobrepase, en ningún caso, a la curva de potencia máxima. En caso contrario entraríamos en la zona prohibida de funcionamiento del transistor, con riesgo de destrucción de éste por sobrecalentamiento. Según estos consejos y observando detenidamente las curvas de la Figura 12.33, se ha seleccionado una corriente de colector de 100 mA para el punto de saturación de la recta de carga.

Una vez determinados los puntos de corte y saturación ($V_{CE} = 4$ V, $I_C = 100$ mA) se dibuja la recta de carga.

Ya podemos determinar el valor R_C:

$$I_{C\,máx} = \frac{V_{CC}}{R_C} \rightarrow R_C = \frac{V_{CC}}{I_{C\,máx}} = \frac{4}{0{,}100} = 40\ \Omega$$

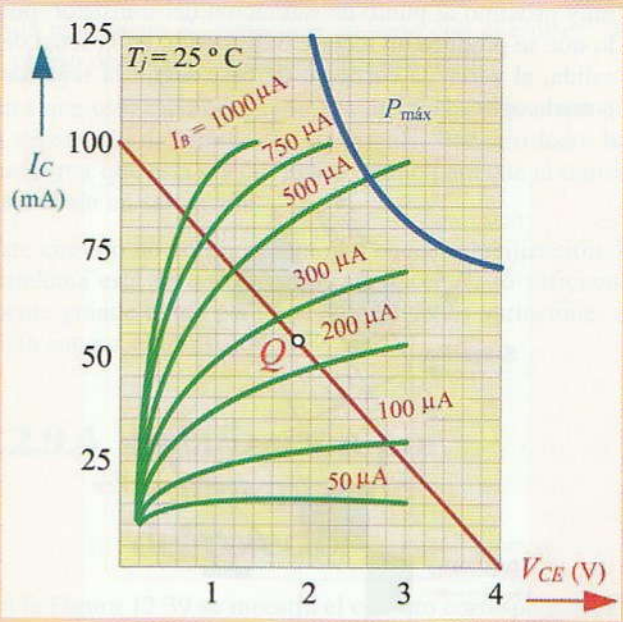


Figura 12.33. **Determinación de $I_{C\,máx}$ mediante las curvas características.**

Una vez hecho esto, ya sólo nos falta determinar la resistencia de polarización R_B para un determinado punto de trabajo del transistor.

El punto de trabajo del transistor debe situarse aproximadamente en el centro de la recta de carga (equidistante de la zona de corte y de la de saturación). Recuerda que en el punto de saturación ($I_{C\,máx}$) el transistor se comporta como un interruptor cerrado, no respondiendo a las variaciones de la corriente de base; y que en el punto de corte ($V_{CE\,máx}$) el transistor se comporta como un interruptor abierto, y la corriente por el colector es aproximadamente igual a cero.

En el ejemplo que nos ocupa, se ha fijado el punto de trabajo para una corriente de base de 250 µA, tal como se puede apreciar en la Figura 12.33.

La razón por la cual se fija el punto de trabajo Q en el centro de la recta de carga es muy simple: téngase en cuenta que la señal que se aplica por la base para ser amplificada es variable y, por tanto, habrá que procurar que esta corriente no llegue a las zonas de corte y saturación del transistor. En caso contrario, se podría distorsionar la señal de salida.

Para entender mejor esta idea, a continuación se muestran tres formas en las que puede llegar a trabajar un amplificador con transistores.

En el ejemplo mostrado en la Figura 12.34 el punto de funcionamiento que se ha seleccionado se encuentra

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

muy próximo al punto de saturación del transistor, por lo que se produce un recorte o distorsión en la señal de salida, al variar la corriente de base según la señal de entrada aplicada.

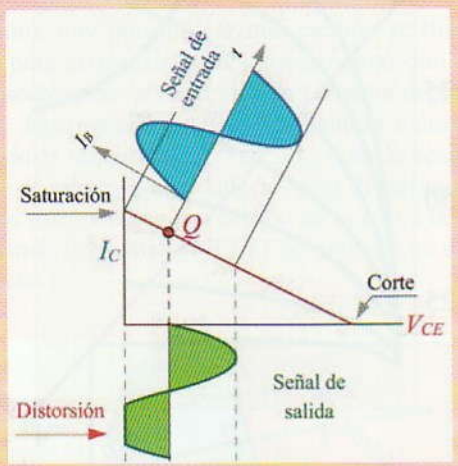


Figura 12.34. Distorsión de la señal de salida por saturación.

En el ejemplo de la Figura 12.35 se ha optado por un punto de trabajo muy próximo al punto de corte, por lo que también se produce distorsión en la señal de salida.

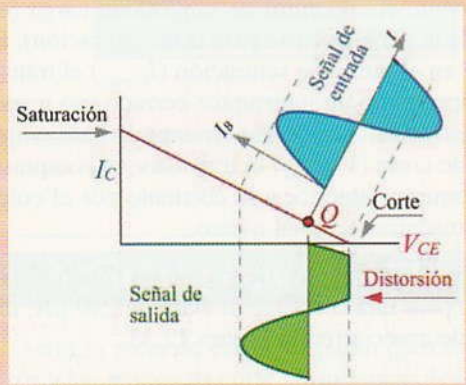


Figura 12.35. Distorsión en la salida por proximidad a la zona de corte.

En el ejemplo mostrado en la Figura 12.36 el punto de funcionamiento que se ha seleccionado parece el correcto, ya que no se produce distorsión en la señal de salida, al variar la corriente de base según la señal de entrada aplicada.

Volviendo al ejemplo de aplicación que estamos resolviendo, ahora tenemos que calcular el valor de la

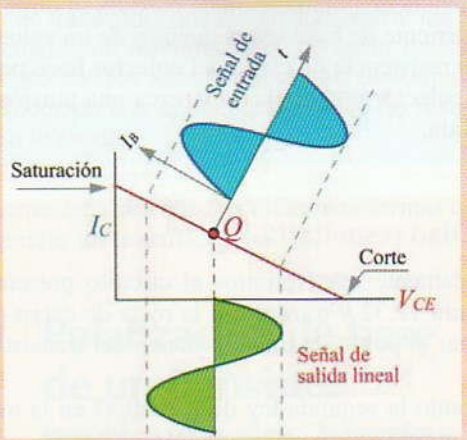


Figura 12.36. Señal sin distorsión.

resistencia de base R_B para que la corriente de base I_B sea de 250 μA. Para ello aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a la malla de la base del circuito de la Figura 12.32:

$$V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE}$$

de esta expresión se deduce que:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B}$$

Tomando como valor aproximado la tensión de polarización directa del diodo emisor $V_{BE} = 0{,}7$ V, la resistencia de polarización será igual a:

$$R_B = \frac{1{,}5 - 0{,}7}{250 \cdot 10^{-6}} = 3.200\ \Omega$$

En la práctica escogeremos valores comerciales para las resistencias calculadas, siendo $R_B = 3{,}3$ kΩ y $R_C = 39\ \Omega$.

Utilización

El punto de funcionamiento del transistor, polarizado de esta manera, varía excesivamente con β y con la temperatura, por lo que esta forma de polarización no es muy adecuada para los transistores que trabajan de una forma lineal. Una de las aplicaciones que se suele dar a esta forma de polarizar al transistor la tenemos en los circuitos digitales, donde el transistor trabaja a modo de interruptor entre el corte y la saturación.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

12.9.2. Polarización de un transistor con una sola fuente de alimentación

Por lo general la polarización de un transistor se realiza mediante una fuente de alimentación; de esta forma se consigue simplificar bastante el circuito. Siguiendo el mismo circuito utilizado como ejemplo para el apartado anterior y calculando la nueva resistencia de polarización de la base R_B, el circuito quedaría ahora tal como se indica en la Figura 12.37.

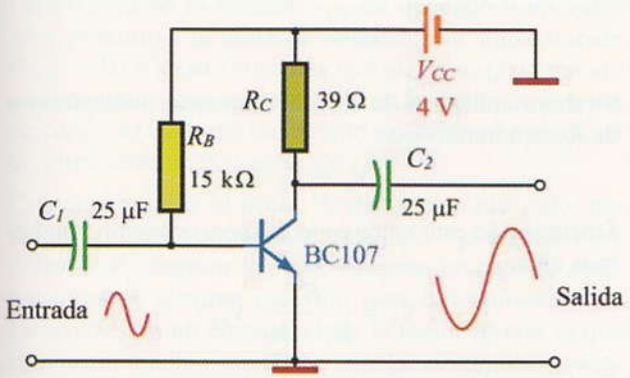


Figura 12.37. Polarización de transistor con una sola fuente de alimentación.

12.9.3. Polarización por realimentación del emisor

En la Figura 12.38 se muestra un transistor polarizado por realimentación del emisor y con una sola fuente de alimentación.

Este circuito no es tan sensible a las variaciones de β y además es más estable en amplios límites de temperatura.

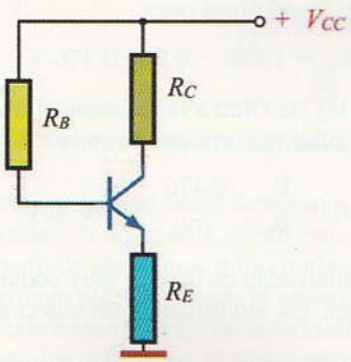


Figura 12.38. Polarización de transistor con realimentación del emisor.

Esto se consigue utilizando la caída de tensión que aparece en la resistencia R_E conectada en serie con el emisor, con el objeto de compensar las variaciones de β.

Para que esta realimentación sea efectiva, se necesita que la resistencia de emisor R_E sea grande. Por otro lado, hay que evitar que ésta sea tan grande como para que el transistor trabaje en saturación.

Este circuito no consigue aún una buena estabilización. El problema está en que no se puede hacer R_E lo suficientemente grande como para que compense las variaciones de β sin saturar el transistor.

12.9.4. Polarización por realimentación del colector

En la Figura 12.39 se muestra el circuito correspondiente a la polarización por realimentación del colector.

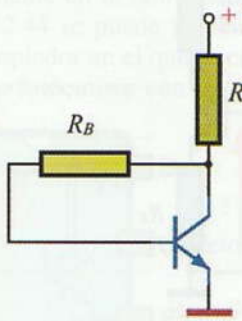


Figura 12.39. Circuito de polarización por realimentación de colector.

La idea de estabilización consiste en conectar la resistencia de polarización al terminal del colector en vez de a la fuente de alimentación. Cuando la ganancia de corriente β tienda a aumentar, aumentará también la corriente de colector y con ella la caída de tensión que aparece en la resistencia de colector R_C. Esto provoca una disminución de la tensión que alimenta a la base, lo que da lugar a una reducción de la corriente de base, por lo que en último término también queda reducida la propia corriente de colector. De esta forma se consigue que los aumentos de la corriente de colector queden compensados por el efecto de realimentación del colector.

Esta polarización resulta, en muchas ocasiones, más interesante que la realimentación del emisor, ya que proporciona una estabilidad bastante aceptable para los cambios de β. Además el circuito es muy sencillo, ya que utiliza sólo dos resistencias.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

12.9.5. Polarización del transistor por realimentación del emisor con divisor de tensión

Este circuito es una variante del circuito de polarización por realimentación del emisor. A este tipo de polarización también se la denomina universal y es la que más se emplea en circuitos lineales de amplificación. En la Figura 12.40 se indica el esquema correspondiente a un circuito de polarización universal. Observa cómo existe un divisor de tensión formado por R_1 y R_2. La tensión que aparece en R_2 es la que polariza directamente la unión base-emisor. Este circuito constituye un buen amplificador lineal y responde muy bien a las pequeñas variaciones de β, y además es estable entre amplios márgenes de temperatura.

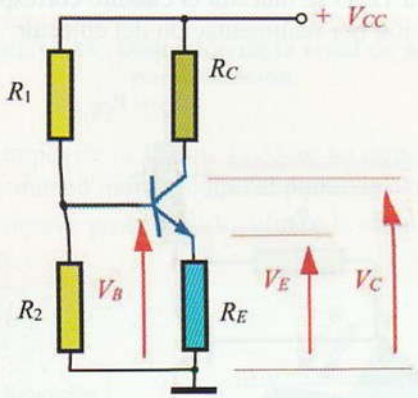


Figura 12.40. Polarización por divisor de tensión.

Actividad resuelta 12.8

Seguidamente, vamos a analizar las magnitudes que se dan en un circuito de este tipo. Para ello resolveremos el circuito ejemplo que se muestra en la Figura 12.41, para encontrar el punto aproximado de funcionamiento del transistor.

El primer paso es determinar la caída de tensión que aparece en la resistencia de base R_2. A esta tensión se la conoce por el nombre de tensión de base V_B (tensión de la base respecto a masa). Para ello, vamos a despreciar el pequeño valor de la corriente de base que atraviesa R_1. En este caso, la corriente que fluye por R_2 estará delimitada por V_{CC} y la suma de R_1 y R_2:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

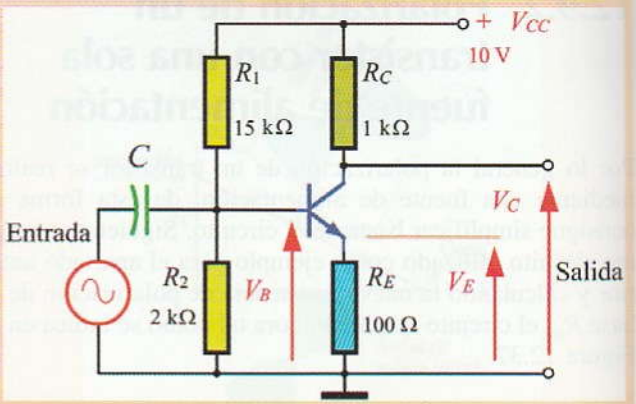


Figura 12.41.

Si ahora aplicamos la ley de Ohm entre los extremos de R_2, tendremos que:

$$V_B = R_2 \cdot I$$

Sustituyendo este valor en la primera ecuación, tendremos que:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

Si ahora aplicamos los valores correspondientes al circuito de nuestro ejemplo, resultará que:

$$V_B = \frac{2.000}{15.000 + 2.000} \cdot 10 = 1{,}176 \text{ V}$$

Para calcular la tensión V_E que aparece en el emisor (tensión del emisor respecto a masa), aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a la malla correspondiente:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

Dado que estamos trabajando con un transistor de silicio, se puede suponer con aproximación que la tensión de polarización directa del diodo emisor-base es de unos 0,7 V. Aplicando estos valores a la última ecuación concluida, tendremos que:

$$V_E = 1{,}176 - 0{,}7 = 0{,}476 \text{ V}$$

Aplicando la ley de Ohm a la resistencia de emisor R_E, podremos calcular la corriente de emisor I_E:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{0{,}476}{100} = 4{,}76 \text{ mA}$$

Dado que la intensidad de base es muy pequeña se puede suponer que las intensidades de colector y emisor son iguales:

$$I_C \approx I_E \quad , \quad I_C = 4{,}76 \text{ mA}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

A continuación, calcularemos la tensión que aparece en el colector V_C (tensión de colector respecto a masa), que será igual a la tensión V_{CC} de la fuente de alimentación menos la caída de tensión $(R_C \cdot I_C)$ que aparece en R_C:

$$V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - (1.000 \cdot 0{,}00476) = 5{,}24 \text{ V}$$

Por último, calcularemos la tensión que aparece entre el colector-emisor, la cual nos indicará el punto de trabajo del transistor. Esta tensión será igual a la diferencia de tensiones que aparece entre el colector y el emisor, es decir:

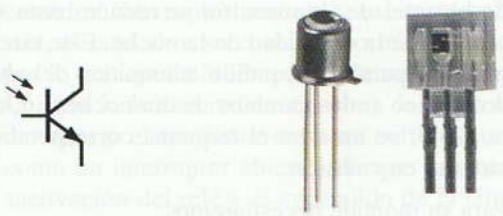
$$V_{CE} = V_C - V_E = 5{,}24 - 0{,}476 = 4{,}76 \text{ V}$$

Observa cómo la tensión V_{CE} ha quedado a un valor muy próximo a la mitad de la tensión de alimentación (V_{CC} = 10 V). Esto significa que el punto Q de trabajo se encontrará aproximadamente en la mitad de la recta de carga, lo cual nos indica que el transistor trabaja en un punto estable de operación.

Conviene resaltar el hecho de que se han utilizado, para este circuito, las tensiones de base V_B, emisor V_E y colector V_C respecto a masa. El conocimiento de estas tensiones es siempre muy útil para la localización de las averías en un circuito, dada la facilidad con la que se pueden medir y contrastar con las originales aportadas por el diseñador.

12.10 Fototransistores

Al igual que ocurría con los diodos fotoemisores, también se fabrican transistores que son sensibles a la radiación luminosa; nos referimos a los fototransistores (véase Figura 12.42).



(a) (b)

Figura 12.42. Fototransistor. (a) Símbolo; (b) Aspecto.

El fototransistor se fabrica de tal forma que pueda llegar la luz hasta el cristal de la base. Cuando esto ocurre, se produce un aumento de portadores minoritarios que hacen que fluya una corriente eléctrica desde el emisor al colector. El valor de esta corriente depende de la intensidad de la radiación luminosa que incide en la base, tal como se puede apreciar en las curvas características de colector de la Figura 12.43.

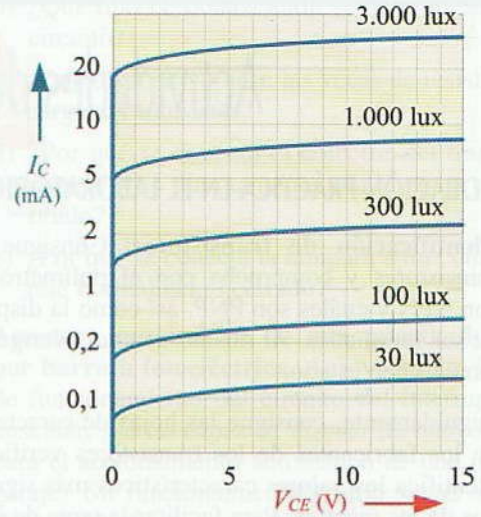


Figura 12.43. Curvas de colector de un fototransistor.

Dado que los fotransistores son más sensibles que los fotodiodos, ya que pueden producir una cierta amplificación de la señal luminosa aplicada a su base, se utilizan mucho más frecuentemente en la fabricación de optoacopladores. En la Figura 12.44 se puede apreciar la estructura de un circuito optoacoplador en el que se combinan las propiedades de un diodo fotoemisor con las de un fototransistor.

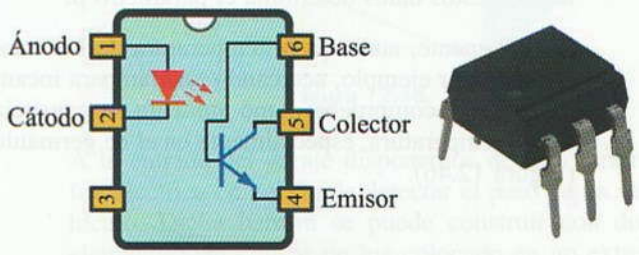


Figura 12.44. Optoacoplador con fototransistor.

En la Figura 12.45, se expone el circuito de un optoacoplador con fototransistor. La señal de entrada produce en el fotodiodo una radiación luminosa dependiente de la intensidad de corriente de dicha señal. Esta radiación incide en la base del fototransistor, produciéndose una señal en la salida que es proporcional a la aplicada a la entrada. Esta transferencia de la señal se realiza sin la intervención de ningún contacto eléctrico, por lo que se consigue aislar eléctricamente los circuitos de entrada y salida

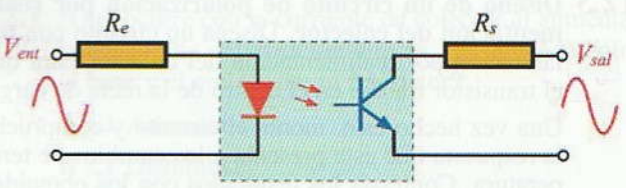


Figura 12.45. Circuito de optoacoplador con transistor.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

12.1 Identificación de transistores. Consigue varios transistores y comprueba con el polímetro cuáles son NPN y cuáles son PNP, así como la disposición de sus terminales. Al mismo tiempo, averigua si están en buen estado.

Seguidamente, consigue las hojas de características de los fabricantes de los transistores verificados e identifica los valores característicos más significativos de los mismos. Para facilitar la tarea de identificación de los transistores, consigue los códigos y normas internacionales más usuales para identificar dispositivos semiconductores y comprueba las referencias dadas por los fabricantes de éstos.

12.2 Determinación de los parámetros de un transistor. Toma un transistor de silicio y otro de germanio y mediante un polímetro digital con transistómetro, averigua su ganancia a temperatura ambiente. Con estos datos determina el parámetro β.

Seguidamente, aumenta la temperatura de los transistores (por ejemplo, acercando una lámpara incandescente) y comprueba cómo aumenta su ganancia con la temperatura, especialmente en el de germanio (Figura 12.46).

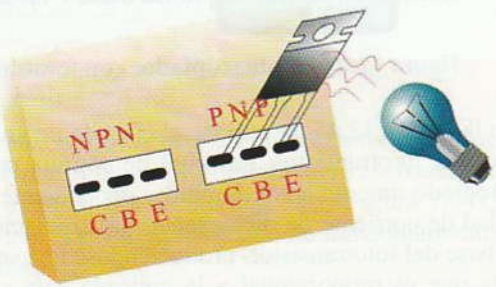


Figura 12.46. Medida de la ganancia con el transistómetro.

12.3 Diseño de un circuito de polarización por realimentación del colector. Diseña un circuito con polarización por realimentación del colector para que el transistor trabaje en el centro de la recta de carga.

Una vez hecho esto, monta el circuito y comprueba la respuesta que éste presenta a los cambios de temperatura. Contrasta los resultados con los obtenidos en los circuitos ensayados en las experiencias.

12.4 Obtención de la curva $I_C = f(I_B)$ de un transistor. Se trata de comprobar de forma práctica en el laboratorio el efecto de amplificación de corriente de un transistor.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito y el procedimiento correspondiente para llevar a cabo esta actividad práctica en el laboratorio.

12.5 Amplificación de corriente y recta de carga de un transistor. Se trata de comprobar de forma práctica en el laboratorio el efecto de amplificación de corriente de un transistor, así como de determinar su punto de trabajo para una determinada corriente de base y la recta de carga.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito y el procedimiento correspondiente para llevar a cabo esta actividad práctica en el laboratorio.

12.6 Análisis de la polarización de un transistor por realimentación del emisor con divisor de tensión. Se trata de comprobar de forma práctica en el laboratorio las magnitudes eléctricas que aparecen en un circuito de este tipo.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito y el procedimiento correspondiente para llevar a cabo esta actividad práctica en el laboratorio.

12.7 Interruptor crepuscular. Se trata de realizar un circuito que sea capaz de activar una lámpara cuando el nivel de iluminación se reduce hasta valores propios de la oscuridad de la noche. Este circuito es muy útil para el encendido automático del alumbrado público en los cambios de día-noche. En la Figura 12.47, se muestra el esquema correspondiente al circuito en cuestión.

Para su montaje necesitaremos:

- Una LDR, que es la que va a hacer las veces de sensor luminoso.
- Un transistor BC 108 o similar, que es el que va a ser capaz de aportar la suficiente corriente para excitar la bobina del relé electromagnético.
- Un relé, que es el que va a abrir y cerrar el circuito principal de las lámparas de alumbrado.
- Un potenciómetro R_1 de 10 kΩ, el cual se ajustará para conseguir la activación del relé para una determinada iluminación.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

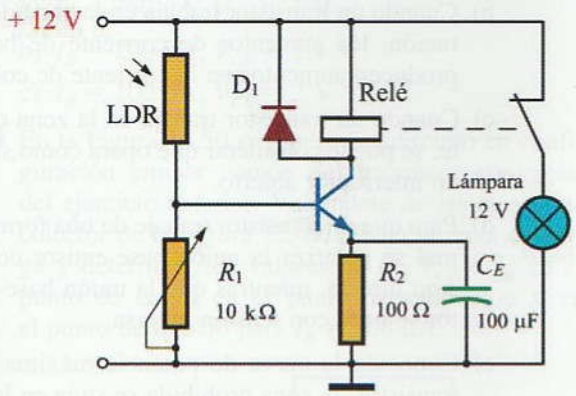


Figura 12.47. Circuito de un interruptor accionado por la luz.

- Una resistencia R_2 de 100 Ω y un condensador de 100 µF, los cuales se encargarán de dar estabilidad al transistor.
- Un diodo D_1 1N4001 para evitar la destrucción del transistor cuando se desconecte el relé (al desconectarse la bobina del relé, la energía acumulada por ésta, por el efecto de autoinducción, se manifiesta como una sobretensión inversa de descarga que puede llegar a destruir las uniones del transistor; el diodo conectado en derivación con dicha bobina descarga esta energía por sí mismo, lo que protege al transistor).

El funcionamiento de este circuito es muy sencillo: para niveles de iluminación elevados (luz de día), la LDR posee un valor lo suficientemente bajo para polarizar la base del transistor y ponerlo en saturación. En estas condiciones, el transistor se comporta como un interruptor cerrado y excita la bobina del relé, el cual abre su contacto normalmente cerrado, por lo que queda la lámpara de alumbrado apagada. Cuando la luz se reduce (noche), la LDR aumenta de valor y el transistor entra en corte (se comporta como un interruptor abierto), lo que provoca la desactivación del relé y el encendido de la lámpara.

Monta el circuito propuesto en la Figura 12.47 y comprueba su funcionamiento. Para conseguir el punto óptimo de activación de las lámparas, deberás ajustar el potenciómetro R_1.

Una vez montado el circuito y comprobado su funcionamiento, contesta a las siguientes cuestiones:

a) Mide las diferentes tensiones del circuito para los distintos niveles de iluminación. ¿En qué condiciones trabaja el transistor en corte y en saturación?

b) ¿Qué tipo de polarización se ha empleado en el circuito?

c) ¿Qué dispositivo hace las veces de resistencia de carga del transistor?

d) ¿Por qué se conecta el colector del transistor a un relé y no directamente a la lámpara de alumbrado?

e) ¿Por qué se conecta la lámpara a un contacto del relé normalmente cerrado?

12.8 Apertura automática de una puerta de garaje por barrera fotoeléctrica. Aprovechando las bases de funcionamiento del circuito del interruptor crepuscular, ¿serías capaz de diseñar un nuevo circuito para el accionamiento automático de una puerta de garaje? Su funcionamiento podría ser el siguiente (Figura 12.48):

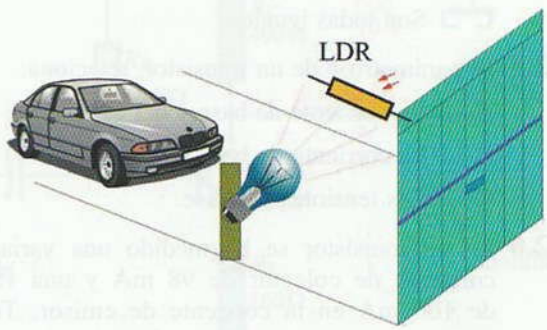


Figura 12.48.

A la entrada del garaje disponemos de una barrera fotoeléctrica con el fin de detectar el paso de un vehículo. Dicha barrera se puede construir con dos elementos: un emisor de luz colocado en un extremo de la entrada que hace incidir su luz en una LDR situada en el extremo opuesto. Al cortar el vehículo el haz luminoso, la LDR cambia de valor óhmico y pone en funcionamiento el motor de la puerta a través de un relé. El circuito se puede completar haciendo que el motor se pare automáticamente al abrirse totalmente la puerta y que, al cabo de un determinado tiempo, la puerta se vuelva a cerrar.

AUTOEVALUACIÓN

12.1 ¿Qué ocurre con la corriente de colector al aumentar la tensión de polarización directa V_{BE} aplicada entre la base y el emisor de un transistor?

A ❑ Aumenta.

B ❑ Disminuye.

C ❑ Se mantiene constante.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

12.2 ¿Qué ocurre con la corriente de colector, al disminuir la corriente de base de un transistor?

A ❑ Aumenta.

B ❑ Disminuye.

C ❑ Se mantiene constante.

12.3 ¿Cómo debe ser la resistencia que presenta un transistor en buen estado entre su colector y su emisor?

A ❑ Alta.

B ❑ Baja.

C ❑ Nula.

12.4 ¿Cuál de las corrientes de un transistor es más elevada?

A ❑ La del emisor.

B ❑ La de la base.

C ❑ Son todas iguales.

12.5 El parámetro β de un transistor, relaciona:

A ❑ La corriente de base y del emisor.

B ❑ La corriente de base y del colector.

C ❑ Las tensiones de base.

12.6 En un transistor se ha medido una variación de corriente de colector de 98 mA y una variación de 100 mA en la corriente de emisor. Teniendo en cuenta que en un transistor se cumple que $I_E = I_C + I_B$, determina el parámetro β.

12.7 ¿Qué significan las siglas V_{CBO} y V_{CEO} en un transistor? Indica las relaciones correctas.

A ❑ V_{CBO} = Tensión directa colector-base con el colector abierto.

B ❑ V_{CEO} = Tensión inversa colector-emisor con la base abierta.

C ❑ V_{CBO} = Tensión inversa colector-base con el emisor abierto.

12.8 En un circuito con transistor montado en configuración emisor común, ¿cuál es el electrodo donde se aplica la señal de entrada y por cuál aparece la salida?

A ❑ Entrada a la base y colector a la salida.

B ❑ Entrada al emisor y colector a la salida.

C ❑ Entrada a la base y emisor a la salida.

12.9 Indica cuál de las siguientes afirmaciones es cierta:

a) En un transistor, con pequeñas modificaciones de la corriente de base, se consiguen grandes variaciones en la corriente de colector.

b) Cuando un transistor trabaja en la zona de saturación, los aumentos de corriente de base no producen aumentos en la corriente de colector.

c) Cuando un transistor trabaja en la zona de corte, se puede considerar que opera como si fuese un interruptor abierto.

d) Para que un transistor trabaje de una forma normal se polariza la unión base-emisor con tensión directa, mientras que la unión base-colector se hace con tensión inversa.

e) Conocida la curva de potencia máxima de un transistor, la zona prohibida se sitúa en la parte inferior de ella.

12.10 ¿Cómo se puede conseguir aumentar la potencia de un transistor?

A ❑ No es posible.

B ❑ Conectando un condensador entre la base y el emisor.

C ❑ Uniéndolo a una aleta de refrigeración.

12.11 Determina la potencia máxima de un transistor, si la corriente nominal de colector es de 50 mA y la tensión nominal de colector-emisor es de 5 V.

12.12 El transistor BC 548 posee una potencia máxima de 500 mW a T_{amb} = 25 °C ¿Cuál será la corriente máxima que podrá fluir por el colector, si la tensión colector-emisor es de 5 V?

12.13 Las curvas de colector de un transistor comercial son las que se exponen en la Figura 12.49. Se trata de determinar la ganancia de corriente de este transistor en los siguientes casos:

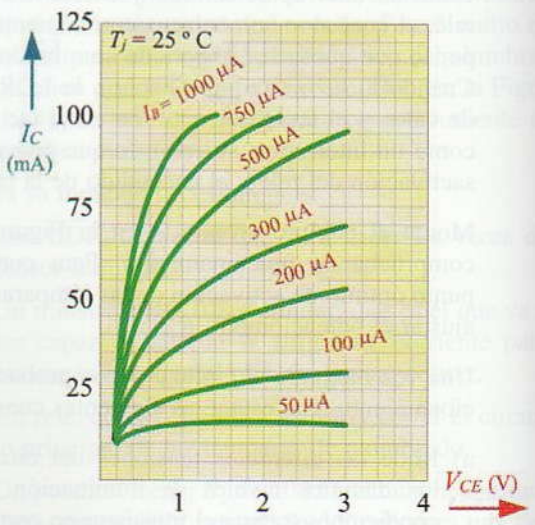


Figura 12.49.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

a) $I_B = 750\ \mu A$, $V_{CE} = 1\ V$

b) $I_B = 200\ \mu A$, $V_{CE} = 1{,}4\ V$

c) $I_B = 100\ \mu A$, $V_{CE} = 2\ V$

12.14 En la Figura 12.50 se muestra el circuito en configuración emisor común del transistor comercial del ejercicio anterior. Valiéndote de las curvas de colector de la Figura 12.49, dibuja la recta de carga y determina los valores de I_C, V_{CE} e I_B en el punto de corte, en el punto de saturación y en el punto de trabajo para $I_B = 300\ \mu A$.

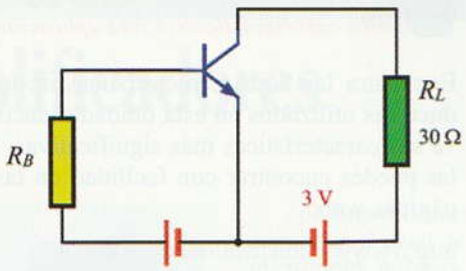


Figura 12.50.

12.15 Indica cuál de las siguientes afirmaciones es cierta:

a) Cuando se diseña un circuito de polarización de un transistor conviene que el punto de trabajo del transistor quede fijado en las proximidades del centro de la recta de carga.

b) La polarización de un transistor en un circuito lineal debe fijar un punto de trabajo con el que se consiga la distorsión en la señal de salida.

c) Los aumentos de temperatura de un transistor hacen disminuir su ganancia de corriente.

d) La polarización por realimentación del emisor consiste en tomar una parte de la tensión que aparece en este terminal que afecte a la polarización de la base.

12.16 Observa atentamente el circuito que se muestra en la Figura 12.51 y contesta a las siguientes cuestiones:

a) ¿Qué función posee el condensador en el circuito?

b) ¿Cómo trabajará el transistor si se abre la resistencia R_B?

12.17 ¿Con qué nombre se conoce al circuito de la Figura 12.52?

A ❑ Polarización por realimentación del emisor.

B ❑ Polarización por realimentación del colector.

C ❑ Polarización por realimentación de la base.

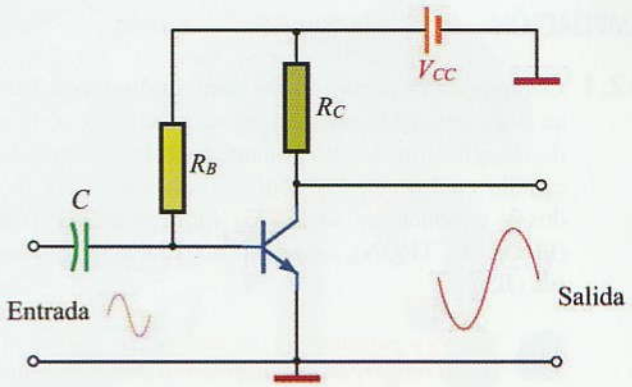


Figura 12.51.

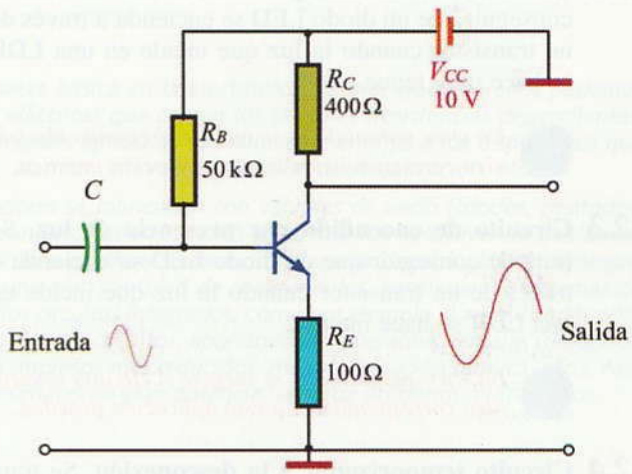


Figura 12.52.

12.18 En el caso de que el transistor que aparece en el circuito de la Figura 12.53 sea de silicio, determina la corriente de colector y la tensión colector-emisor, así como los valores de V_B, V_E y V_C.

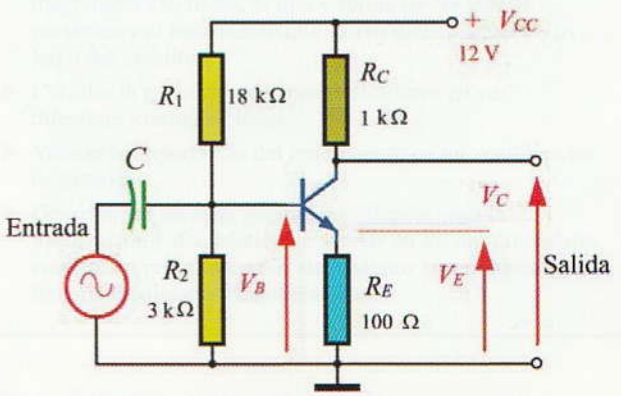


Figura 12.53.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

AMPLIACIÓN

12.1 Códigos de designación de semiconductores. Busca documentación en Internet relativa a los códigos de designación de componentes semiconductores y estudia cuáles son los códigos utilizados para diodos y conductores según los fabricantes europeos (PROELECTRÓN), americanos (JEDEC) y japoneses (JIS).

En www.paraninfo.es se incluye un documento con el nombre de «Identificación de componentes semiconductores», donde podrás estudiar los códigos de designación de los semiconductores.

12.2 Circuito de encendido por falta de luz. Se trata de conseguir que un diodo LED se encienda a través de un transistor cuando la luz que incide en una LDR se hace muy tenue.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

12.3 Circuito de encendido por presencia de luz. Se trata de conseguir que un diodo LED se encienda a través de un transistor cuando la luz que incide en una LDR se hace intensa.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

12.4 Circuito temporizador a la desconexión. Se trata de conseguir que un diodo LED se encienda a través de un transistor cuando accionemos un pulsador y que permanezca encendido solamente durante el tiempo predeterminado por un circuito temporizador construido a base de una red RC.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

12.5 Circuito detector de humedad. Este circuito consta de dos transistores que consiguen encender una lámpara o activar un sistema de riego automático cuando dos electrodos detectan un cierto grado de humedad.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

12.6 Encuentra las hojas características de los semiconductores utilizados en esta unidad didáctica y observa sus características más significativas. Estas hojas las puedes encontrar con facilidad en las siguientes páginas web:

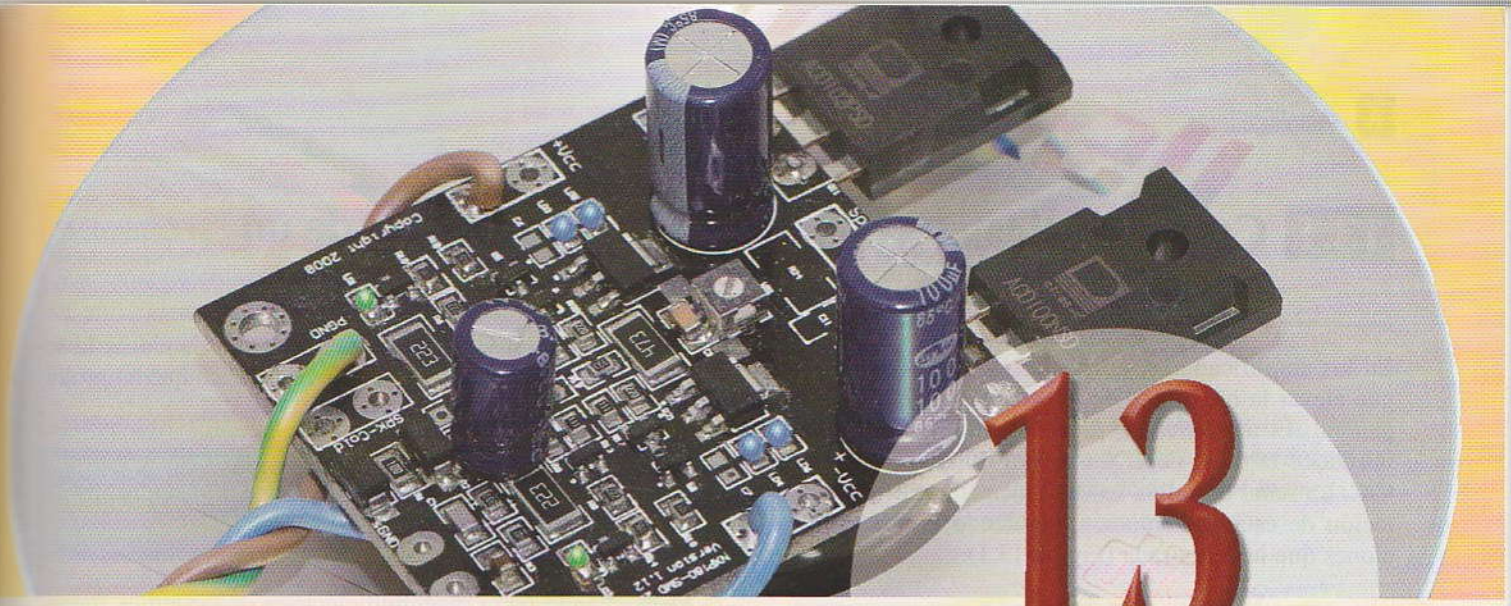
http://www.datasheetlocator.com/es/

http://www.datasheetcatalog.net/es/

12.7 Como en otras ocasiones, consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, busca un fabricante de transistores, analiza las características de los diferentes tipos fabricados, como pueden ser: tipos de transistores fabricados, aplicaciones, dimensiones, encapsulados, denominaciones comerciales, ganancia de corriente, tensiones de ruptura, corriente de colector máxima, potencia máxima, curvas características, etc.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



13

Amplificadores

Los amplificadores son una pieza básica en la electrónica, ya que gracias a ellos podemos aumentar el nivel de las señales eléctricas que captan los sensores (resistencias dependientes, micrófonos, antenas, etc.) para después aplicarlas con suficiente energía a los dispositivos que las trasforman en algo útil (relés, alarmas, altavoces, pantallas de visualización, etc.).

En un principio los amplificadores se fabricaban con válvulas de vacío (triodos, pentodos, etc.), pero la llegada de los semiconductores en los años cincuenta fue sustituyendo paulatinamente a éstas por los transistores. Hoy en día el avance de las nuevas tecnologías ha conseguido integrar en un solo elemento una gran cantidad de componentes, consiguiendo sistemas de amplificación a base de uno o varios circuitos integrados, como por ejemplo el amplificador operacional. Esto simplifica enormemente los circuitos, aportando innumerables ventajas (reducción de costes de fabricación, circuitos impresos más reducidos, menor disipación térmica, etc.). Aun así, cuando se trata de amplificar señales de gran potencia, se sigue utilizando el transistor.

Contenido

13.1. **Características del amplificador**
13.2. **Amplificadores de pequeña señal con transistores**
13.3. **Acoplamiento de amplificadores**
13.4. **Amplificadores de potencia**
13.5. **Localización de averías y reparación en un amplificador**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Distinguir los diferentes tipos de amplificadores.
- Describir el funcionamiento de los amplificadores de pequeña señal, explicando las características, valores de las magnitudes eléctricas, el tipo y forma de las señales presentes y el tratamiento que sufren dichas señales a lo largo del circuito.
- Calcular la ganancia de los amplificadores en sus diferentes configuraciones.
- Valorar la importancia del rendimiento en un amplificador de potencia.
- Describir las técnicas generales utilizadas para la localización y diagnóstico de averías en los amplificadores, empleando procedimientos sistemáticos y normalizados en función de distintas consideraciones.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

13.1 Características del amplificador

En los amplificadores, gracias a los transistores, se consigue elevar la intensidad de los sonidos y de las señales en general. El amplificador posee una entrada por donde se introduce la señal débil y otra por donde se alimenta con C.C. La señal de salida se ve aumentada gracias a la aportación de esta alimentación, siguiendo las mismas variaciones que la de entrada (Figura 13.1).

Figura 13.1. El amplificador eleva el nivel de la señal aplicada a su entrada.

En la Figura 13.2 se muestra la disposición básica de un amplificador de sonido. La señal de entrada, de bajo nivel (del orden de unos pocos milivoltios), la aportan dispositivos como: el micrófono (transforma las ondas sonoras en señales eléctricas que siguen las mismas variaciones que las primeras), el reproductor de discos (transforma las señales grabadas en los surcos del disco en señales eléctricas), el magnetófono (transforma las señales grabadas magnéticamente en una cinta, en señales eléctricas), etc. El amplificador de audio toma estas señales eléctricas y, manteniendo intacta sus cualidades, las eleva de valor (del orden de unos cuantos voltios). Estas señales ya son lo suficientemente fuertes como para poder ser transformadas en sonidos audibles por parte del altavoz.

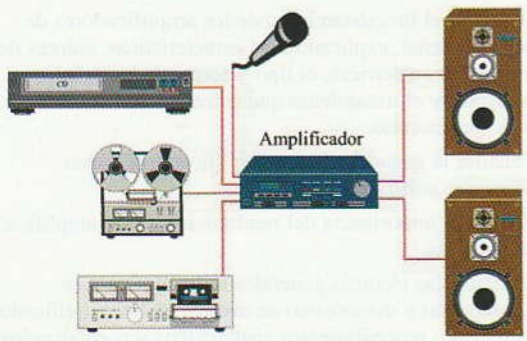


Figura 13.2. Amplificador de audio.

Estudiaremos a continuación algunas de las características de los amplificadores que nos ayudarán a entender la función propia de los mismos.

13.1.1. Ganancia de un amplificador

Cuando un amplificador realiza la función de elevar la señal que ha sido aplicada a su entrada, se dice que ha producido una determinada ***ganancia***.

> Se puede decir que la ganancia de un amplificador es la *relación que existe entre el valor de la señal obtenida a la salida y el de la entrada.*

Dependiendo de la magnitud eléctrica que estemos tratando, se pueden observar tres tipos de ganancias (Figura 13.3):

- **Ganancia de tensión:** Que se obtiene midiendo el valor de la tensión de entrada y el de salida y realizando su cociente.

$$A_v = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}}$$

- **Ganancia de corriente:** Se obtiene midiendo el valor de la intensidad de salida y el de entrada, efectuando su cociente.

$$A_i = \frac{I_{salida}}{I_{entrada}}$$

- **Ganancia de potencia:** Se obtiene, al dividir la potencia obtenida en la salida, entre la potencia entregada a la entrada. Se puede comprobar con facilidad que, al realizar esta operación, el resultado que se obtiene coincide con el producto de las ganancias de tensión y corriente.

$$A_p = A_v \cdot A_i$$

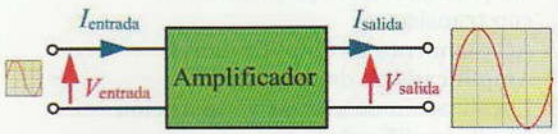


Figura 13.3. El amplificador produce ganancia en la señal de entrada.

Es corriente encontrarnos con la ganancia expresada en decibelios (dB). El decibelio es una unidad que se emplea para medir el nivel sonoro. Para calcular la ganancia de un amplificador en dB aplicamos las siguientes expresiones:

- Ganancia de tensión: $a_v = 20 \log A_v$
- Ganancia de corriente: $a_i = 20 \log A_i$
- Ganancia de potencia: $a_p = 10 \log A_p$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 13.1

La señal de entrada de un amplificador es de 10 mV y 1 mA. Determina la ganancia de tensión, potencia y corriente de este amplificador, si la señal que se obtiene en la salida es de 1 V y 10 mA.

Solución:

$$A_v = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{1}{0{,}01} = 100$$

$$A_i = \frac{I_{salida}}{I_{entrada}} = \frac{10}{1} = 10$$

$$A_p = A_v \cdot A_i = 100 \cdot 10 = 1.000$$

En decibelios:

$$a_v = 20 \cdot \log A_v = 20 \cdot \log 100 = 40 \text{ dB}$$
$$a_i = 20 \cdot \log A_i = 20 \cdot \log 10 = 20 \text{ dB}$$
$$a_p = 10 \cdot \log A_p = 10 \cdot \log 1000 = 30 \text{ dB}$$

En conclusión, con este amplificador hemos conseguido una ganancia de 100 veces para la tensión y de 10 para la corriente, por lo que se ha conseguido multiplicar por 1.000 la potencia de la señal de entrada.

13.1.2. Adaptación de impedancias en un amplificador

Los amplificadores poseen una característica fundamental, que es la impedancia que presentan a su entrada y a su salida.

- **Impedancia de entrada:** Es la impedancia que ofrece un amplificador a la entrada, y se calcula aplicando la ley de Ohm entre sus extremos:

$$Z_e = \frac{V_{entrada}}{I_{entrada}}$$

- **Impedancia de salida:** Es la impedancia que ofrece el amplificador a su salida:

$$Z_s = \frac{V_{salida}}{I_{salida}}$$

Para el amplificador del ejemplo anterior, la impedancia de entrada y salida sería:

$$Z_{ent} = \frac{V_{entrada}}{I_{entrada}} = \frac{0{,}01}{0{,}001} = 10\ \Omega$$

$$Z_{sal} = \frac{V_{salida}}{I_{salida}} = \frac{1}{0{,}01} = 100\ \Omega$$

La impedancia de entrada de un amplificador (Z_{ent}) limita el paso de corriente proporcionado por el generador de señales, de tal forma que se podría decir que es la carga que presenta a dicho generador de señales.

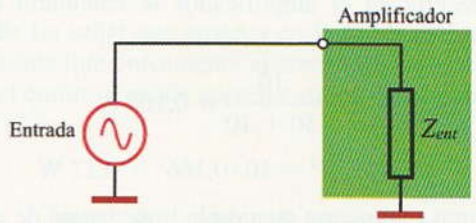


Figura 13.4. Impedancia de entrada del amplificador y del generador de señales.

Los generadores de señal también poseen una impedancia característica, dependiendo este valor del tipo de generador. Así, por ejemplo, para un receptor de radio, la antena es el generador de señales y su impedancia es de unos 50 Ω. En el caso de que el generador de señales fuera un micrófono, la impedancia podría ser algo mayor, del orden de los 10 kΩ.

Para que un sistema posea un rendimiento máximo, la impedancia del generador debe ser igual a la entrada del amplificador. Esto es lo que se conoce como «adaptación de impedancias».

Actividad resuelta 13.2

Para entender el concepto de adaptación de forma práctica vamos a suponer los siguientes tres casos:

a) En el primer caso, tal como se muestra en la Figura 13.5, tenemos un generador de señales de 10 V con una impedancia Z_G de 50 Ω. La impedancia de entrada del amplificador Z_{ent} es también de 50 Ω.

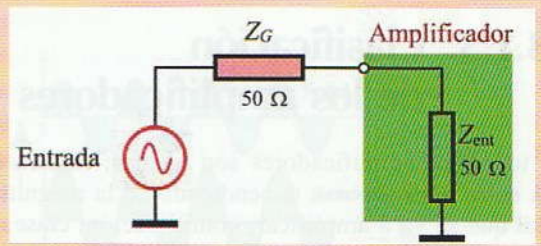


Figura 13.5. Impedancias iguales.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Las dos impedancias quedan en serie, por lo que la corriente que se establece en el circuito es igual a:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10}{50 + 50} = 0{,}1 \text{ A}$$

Suponiendo que las dos impedancias son resistivas, la potencia que aparece en el amplificador es:

$$P = Z_{ent} I^2 = 50 \cdot 0{,}1^2 = 0{,}5 \text{ W}$$

b) En el caso de que la impedancia de entrada del amplificador hubiese sido de 10 Ω, la potencia que aparecería en el amplificador se calcularía de la misma forma:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10}{50 + 10} = 0{,}166 \text{ A}$$

$$P = Z_{ent} I^2 = 10 \cdot 0{,}166^2 = 0{,}27 \text{ W}$$

c) Veamos qué ocurre cuando la impedancia de entrada del amplificador sea superior a la del generador. En este caso hemos supuesto que dicha impedancia es igual a 100 Ω.

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10}{50 + 100} = 0{,}066 \text{ A}$$

$$P = Z_{ent} I^2 = 100 \cdot 0{,}066^2 = 0{,}44 \text{ W}$$

En conclusión, la máxima potencia en el amplificador se consigue cuando las dos impedancias son iguales.

La impedancia de entrada de los amplificadores depende fundamentalmente del tipo de configuración que se emplee. Seguidamente, proporcionamos una relación aproximada de estos valores:

Colector común	Base común	Emisor común
Gran impedancia de entrada	Muy pequeña impedancia de entrada	Valor intermedio de impedancia de entrada
($Z_{ent} \cong 300$ kΩ)	($Z_{ent} \cong 50$ Ω)	($Z_{ent} \cong 50$ kΩ)

13.1.3. Clasificación de los amplificadores

No todos los amplificadores son iguales; existen diferencias entre unos y otros, dependiendo de la magnitud de la señal que se va a amplificar, configuración, clase, acoplamiento y aplicaciones. En la Tabla 13.1 se hace una clasificación de éstos:

Tabla 13.1. Clasificación de los amplificadores.

Dependiendo de la señal	De pequeña señal
	De señales fuertes o de potencia
Por su configuración	Emisor común
	Colector común
	Base común
Por su clase	Clase A
	Clase B
	Clase C
	Clase AB
Por la frecuencia de señal	De corriente continua
	De audiofrecuencia (AF)
	De vídeofrecuencia (VF)
	De radiofrecuencia (RF)
	De VHF y UHF

• **Dependiendo de la señal:** Existen muchas aplicaciones donde el uso de una sola etapa amplificadora no es suficiente para elevar la señal de entrada al nivel deseado. Por esta razón, se emplean varias etapas amplificadoras acopladas adecuadamente, con el fin de imprimir en cada una de ellas el nivel de amplificación adecuado y, así, conseguir una señal de salida sin distorsión y con el máximo rendimiento por parte del conjunto del amplificador.

Así, por ejemplo, la señal de audio proporcionada por un micrófono o la señal recogida en la antena de un receptor de radio posee un nivel que en la mayoría de las ocasiones no alcanza unos pocos milivoltios o incluso microvoltios. En estos casos, se hace necesario por lo menos de dos, tres o más etapas amplificadoras. Éste es el caso del ejemplo mostrado en la Figura 13.6, donde se aprecia la estructura de un amplificador de audio en un diagrama de bloques. Existe un amplificador previo, o preamplificador de pequeña señal, que toma la débil señal proveniente del micrófono y la eleva hasta un nivel adecuado. Esta señal se vuelve a amplificar en la etapa excitadora hasta obtener el nivel suficiente para excitar la etapa correspondiente al amplificador de potencia. Esta última etapa consigue elevar el nivel de la señal suficientemente como para excitar el altavoz de salida.

Los amplificadores de pequeña señal se utilizan en etapas previas y poseen una ganancia muy grande de tensión. Este tipo de amplificadores posee una respuesta lineal, es decir, debe ser fiel y no distorsionar las señales.

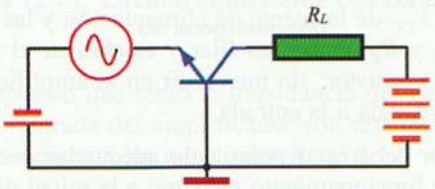
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

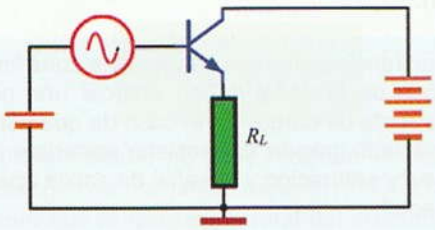
Figura 13.6. Diagrama de bloques de las diferentes etapas amplificadoras de un amplificador de audio.

Un amplificador de potencia maneja señales más fuertes y se emplea en las etapas finales. En este amplificador la zona de trabajo es del todo lineal.

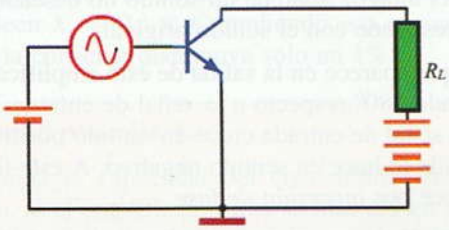
- **Por su configuración** (véase la Figura 13.7).



Base común



Colector común



Emisor común

Figura 13.7. Clasificación de los amplificadores por su configuración.

- **Por su clase:** Esta clasificación es debida a que no todos los amplificadores presentan todo el conjunto del ciclo de señal de entrada en la salida.

Clase A: En la Figura 13.8 se muestra el aspecto de las señales de entrada y salida de un amplificador de clase A.

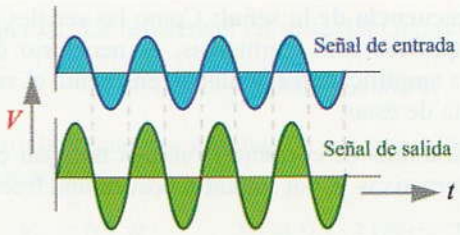


Figura 13.8. Respuesta de un amplificador de clase A.

La señal que aparece en la salida no está distorsionada con respecto a la de entrada.

Clase B: La señal que aparece en la salida está recortada, de tal forma que únicamente aparecen los semiciclos positivos, tal como se puede apreciar en los oscilogramas de la Figura 13.9.

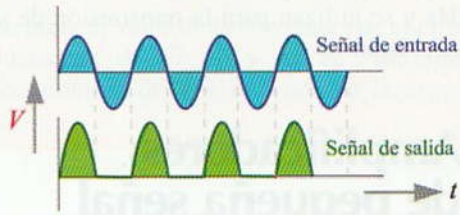


Figura 13.9. Respuesta de un amplificador de clase B.

Clase C: En este caso, la corriente que aparece como señal de salida fluye menos de un semiciclo, tal como se aprecia en la Figura 13.10.

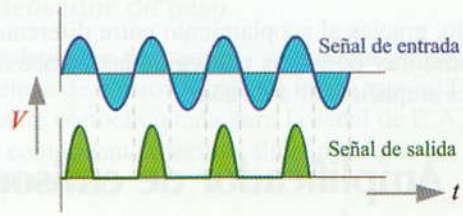


Figura 13.10. Respuesta de un amplificador de clase C.

Clase AB: La señal que aparece en la salida es una combinación de la clase A y B, es decir, aparece una pequeña distorsión en los picos de la señal de salida (véase la Figura 13.11).

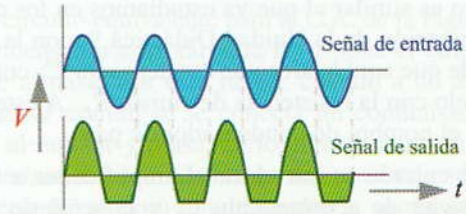


Figura 13.11. Respuesta de un amplificador de clase AB.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

• **Por la frecuencia de la señal:** Como las señales que se quieren amplificar son alternativas, es necesario diseñar los circuitos amplificadores, teniendo en cuenta el valor de la frecuencia de éstas.

Los amplificadores de corriente continua trabajan con señales no alternativas y, por lo tanto, poseen una frecuencia cero.

Los de audiofrecuencia o de baja frecuencia trabajan con frecuencias audibles en un margen de 20 Hz a 20 kHz.

Los amplificadores de videofrecuencia se utilizan para señales en un margen de frecuencias de entre 20 Hz y 15 MHz.

Los amplificadores de radiofrecuencia o de alta frecuencia, se utilizan en sistemas de transmisión de señales de radio y manejan frecuencias del orden de 200 kHz a 300 MHz.

Los de VHF y UHF trabajan en frecuencias de cientos o miles de MHz y se utilizan para la transmisión de señales de audio y televisión.

13.2 Amplificadores de pequeña señal con transistores

Una vez que ya conocemos las distintas polarizaciones y características de un amplificador, vamos a estudiar, con detenimiento, los procesos que se dan en los amplificadores de pequeña señal en sus tres configuraciones posibles.

Por otro lado, gracias al acoplamiento entre diferentes etapas amplificadoras podemos conseguir las características deseadas del amplificador a diseñar.

13.2.1. Amplificador de emisor común

Este tipo de amplificador es muy empleado en etapas previas en los amplificadores de audio, ya que proporciona una respuesta lineal, es decir, pertenece a la clase A.

En la Figura 13.12 se muestra un amplificador de emisor común.

Este circuito es similar al que ya estudiamos en los circuitos de polarización de la Unidad Didáctica 9, con la única diferencia de que aquí aparece un condensador C_E conectado en paralelo con la resistencia de emisor R_E. A éste se lo conoce por el nombre de condensador de paso.

La señal de entrada se introduce al amplificador a través del condensador de acoplamiento C_1 y la señal de salida aparece amplificada entre los terminales del colector y masa.

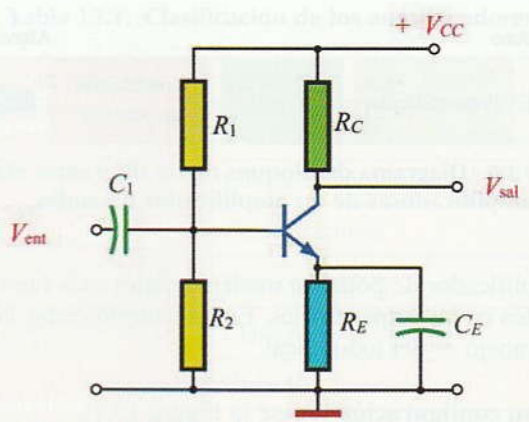


Figura 13.12. Amplificador de emisor común.

La tensión V_{CC} de la fuente de alimentación y las resistencias R_1, R_2 y R_E consiguen fijar y estabilizar el punto de trabajo del transistor, sin intervenir en la amplificación de la señal inyectada a la entrada.

El transistor debe estar polarizado adecuadamente con un punto Q de funcionamiento próximo a la mitad de la recta de carga. De esta forma, conseguimos que el amplificador opere de una forma lineal o de alta fidelidad (sin distorsión en la salida).

> Para que el transistor trabaje dentro de la zona lineal, las fluctuaciones de la señal deben abarcar una pequeña parte de la recta de carga. En el caso de que esta señal fuese demasiado grande, el transistor entraría en las zonas de corte y saturación y la señal de salida aparecería distorsionada.

Así, por ejemplo, si un amplificador de audio distorsiona la señal, en el altavoz aparece un sonido no deseado, que ya no se corresponde con el sonido original.

La señal que aparece en la salida de este amplificador queda desfasada 180° respecto a la señal de entrada; es decir, cuando la señal de entrada crece en sentido positivo, la señal de salida lo hace en sentido negativo. A este fenómeno se lo conoce por *inversión de fase*.

A continuación, vamos a ocuparnos de la misión de los condensadores de acoplamiento y de paso, así como a determinar las ganancias de tensión, resistencias de entrada y salida mediante circuitos equivalentes.

Condensador de acoplamiento

Al estudiar las polarizaciones del transistor ya indicamos cómo este condensador permite el paso de la señal de C.A. proveniente del generador de señales y bloquea la componente continua que pudiese contener ésta.

Así, por ejemplo, si realizamos un circuito equivalente como el que se muestra en la Figura 13.13, donde única-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

mente aparezca la impedancia del generador de señales, el condensador de acoplamiento y la impedancia de entrada del amplificador, podremos analizar más fácilmente los fenómenos que se producen.

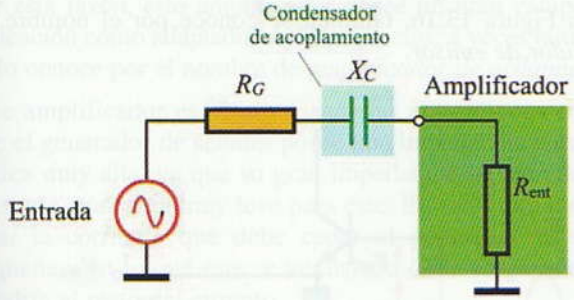


Figura 13.13. Circuito equivalente con condensador de acoplamiento.

Se ha supuesto que tanto la impedancia del generador como la de entrada del amplificador son resistencias, de ahí que aparezcan con las notaciones R_G y R_{ent}.

Como el circuito está en serie, la resistencia total será: $R = R_G + R_{ent}$. Para calcular la corriente que se establece en este circuito, aplicamos la ley de Ohm para C.A.:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Como el condensador no debe bloquear el paso de la corriente eléctrica, la reactancia capacitiva X_C deberá ser bastante menor que la resistencia total del circuito R.

Para un buen diseño, X_C debe ser menor o igual que el 10% de R para la frecuencia más baja de trabajo del amplificador, es decir $X_C \leqslant 0{,}1\ R$. Cumpliendo esta norma se consigue que la corriente disminuya sólo un 1%.

Actividad resuelta 13.3

Determina la capacidad del condensador de acoplamiento, si el amplificador que se muestra en la Figura 13.14 trabaja dentro de las frecuencias de audio (20 Hz a 20 kHz).

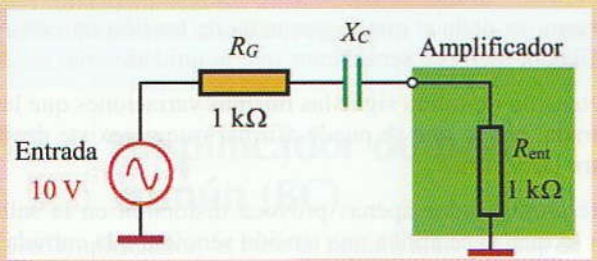


Figura 13.14.

Solución: La resistencia en serie del circuito es:

$$R = 1.000 + 1.000 = 2.000\ \Omega$$

y para la frecuencia más baja la reactancia del condensador será:

$$X_C \leqslant 0{,}1\ R \quad , \quad X_C = 0{,}1 \cdot 2.000 = 200\ \Omega$$

Determinaremos ahora la capacidad del condensador para una frecuencia de 20 Hz.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 200} = 3{,}98 \cdot 10^{-5}\ \text{F} = 39{,}8\ \mu\text{F}$$

Consultando en un catálogo comercial encontraremos que el condensador más aproximado por exceso es el de 47 μF.

Determina el valor de la corriente por el circuito con el condensador de 47 μF y sin él. ¿Se cumple la relación mínima del 1% indicada en la exposición teórica?

Recuerda que la función del condensador de acoplamiento es la de permitir el paso de la señal de C.A. proveniente de la señal de entrada y bloquear la componente continua que pudiese contener la misma.

Condensador de paso

El condensador de paso C_E se conecta en paralelo con la resistencia de emisor R_E, de tal forma que ésta quede prácticamente cortocircuitada para la señal de C.A. Sin embargo, la componente continua fluye por R_E como si no hubiese condensador.

En la Figura 13.15(a), se muestra cómo el condensador hace que la componente alterna de la corriente de emisor se derive directamente a masa, mientras que la continua atraviesa a la resistencia R_E.

En la Figura 13.15(b) se ha hecho un circuito equivalente para la C.C. El condensador actúa para la C.C. como un interruptor abierto.

En el circuito equivalente para la C.A. de la Figura 13.15(c), el condensador cortocircuita R_E y pone el emisor directamente a masa. Por esta razón, cuando a un amplificador de emisor común se le conecta un condensador de paso entre el emisor y masa, se lo conoce como *amplificador con emisor a masa*. Como ya veremos más adelante, este condensador mejora notablemente la ganancia del amplificador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

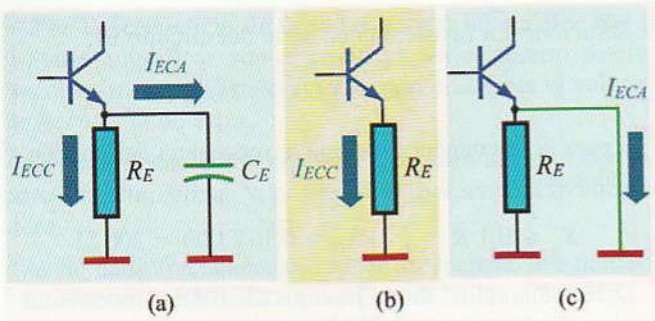


Figura 13.15. (a) Condensador de paso. (b) Circuito equivalente de C.C. (c) Circuito equivalente de C.A.

Recuerda que la función primordial que posee el condensador de paso C_E es la de aumentar la ganancia del amplificador.

El uso de condensadores de paso resulta ventajoso para aquellos casos en que la frecuencia no es muy baja. Hay que tener en cuenta que cuanto más baja es la frecuencia mayor es la reactancia del condensador, aspecto que no interesa, ya que se recomienda que para que éste sea efectivo $X_C \leqslant 0{,}1 \cdot R_E$.

Impedancia de entrada y salida

Resulta muy interesante conocer la impedancia de entrada y salida de un amplificador, sobre todo, en los casos en que se desea acoplar diferentes etapas en serie.

En un amplificador de emisor común este valor viene a ser del orden de 50 kΩ.

Por otro lado, la impedancia de salida de C.A. es del orden de 1 kΩ, dependiendo fundamentalmente de la resistencia de colector R_C.

Por último, haremos un resumen de los aspectos de más interés del amplificador de emisor común:

a) En este amplificador el emisor del transistor es común a la señal de entrada y a la de salida.

b) La señal alterna de entrada hace que varíen la corriente de base y colector y la tensión de salida.

c) La tensión de salida aparece amplificada según la ganancia ($V_{sal} = -A_v \cdot V_{ent}$) y con una inversión de fase de 180º.

d) El punto estático de funcionamiento del amplificador debe estar en el centro de la recta de carga y la variación pico a pico de la corriente de colector deberá ser menor del 10% del valor estático. Así, se elimina la posibilidad de distorsión.

e) La ganancia de tensión depende de los valores de la resistencia de colector y de emisor.

f) El condensador de paso del emisor aumenta la ganancia de tensión.

13.2.2. Amplificador de colector común (C.C.)

Este circuito amplificador, del cual se muestra el esquema en la Figura 13.16, también se conoce por el nombre de *seguidor de emisor*.

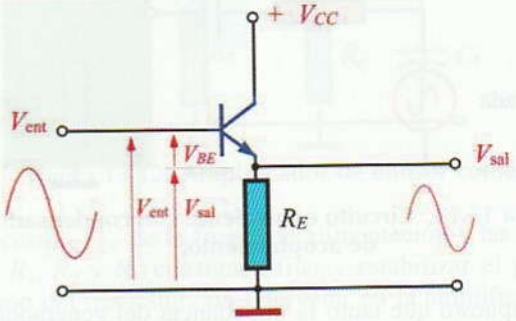


Figura 13.16. Amplificador de colector común.

Estos amplificadores poseen una impedancia de entrada muy elevada, del orden de cientos de miles de ohmios. Esta característica hace que el amplificador de colector común sea ideal en los casos en que el generador de señales posea una impedancia característica muy elevada. De esta forma, se consigue que la señal de C.A. no se pierda en la impedancia alta de dicho generador. Después de este amplificador, puede seguir una etapa amplificadora con emisor común, que posee una mayor ganancia de tensión.

Veamos cómo opera este amplificador.

Según se puede apreciar en la Figura 13.16, la tensión de entrada se aplica directamente a la base del transistor y la tensión de salida aparece en el emisor. Esta tensión es siempre algo inferior a la de entrada, tal como se deduce de la siguiente relación:

$$V_{sal} = V_{ent} - V_{BE}$$

Así, por ejemplo, si $V_{ent} = 10$ V, como V_{BE} en un transistor de silicio es 0,7 V:

$$V_{sal} = 10 - 0{,}7 = 9{,}3 \text{ V}$$

De aquí se deduce que la ganancia de tensión en este amplificador siempre será menor que la unidad.

La tensión de salida sigue las mismas variaciones que la de entrada, por lo que se puede afirmar que no existe desfase entre las mismas.

Este amplificador apenas provoca distorsión en la salida. Por lo que, si se aplica una tensión senoidal a la entrada, se puede comprobar cómo aparece en la salida una tensión de tipo senoidal sin distorsión.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Utilidad del amplificador de colector común

La impedancia de entrada de este amplificador es extremadamente elevada, mientras que la impedancia de salida del mismo es muy baja, del orden de unas decenas de ohmios. Por esta razón, este amplificador posee un gran campo de aplicación como adaptador de impedancias; a veces también se lo conoce por el nombre de *amplificador de aislamiento*.

Este amplificador es ideal en aquellas aplicaciones en las que el generador de señales posee una impedancia característica muy alta, ya que su gran impedancia de entrada representa una carga muy leve para éste. En estas circunstancias, la corriente que debe ceder el generador es muy pequeña, con lo que éste se ve aislado de la carga que supondría el resto del circuito.

Por último indicar que, al poseer este amplificador una ganancia cercana a la unidad, habrá que utilizarlo en combinación con los amplificadores de emisor común para conseguir los efectos de amplificación deseados, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 13.17.

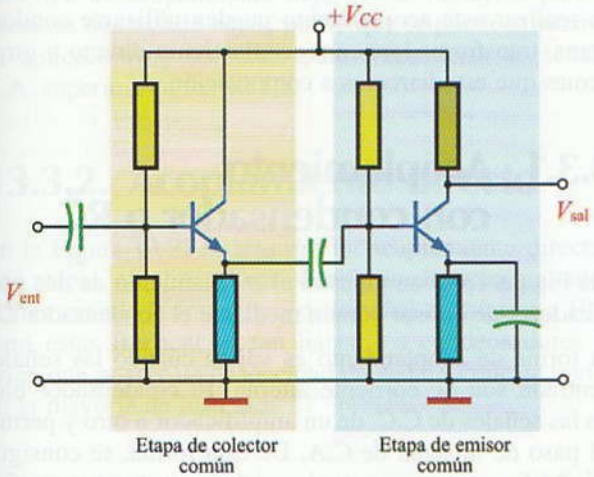


Figura 13.17. Combinación de un amplificador de colector común de gran impedancia de entrada con uno de emisor común de gran ganancia.

Recuerda que un amplificador de colector común se caracteriza por poseer una impedancia de entrada muy elevada, una ganancia de tensión menor que la unidad y que la ditorsión en la salida, respecto a la señal de entrada, es mínima.

13.2.3. Amplificador de base común (BC)

En este amplificador, la base es común a las señales de entrada y salida, tal como se muestra en el circuito de la Figura 13.18. La señal de entrada se aplica al emisor y la señal de salida se obtiene en el colector. Las resistencias R_1 y R_2 forman un divisor de tensión que polariza la base. El condensador C_3 conecta la señal de C.A. de la base a masa.

La impedancia de entrada de un amplificador de base común es muy baja, del orden de decenas de ohmios (aproximadamente se cumple que $Z_{ent} = R_E$). Esto lo hace muy útil para las etapas de amplificación en las que existen generadores de baja impedancia.

Sin embargo, la impedancia de salida es muy elevada.

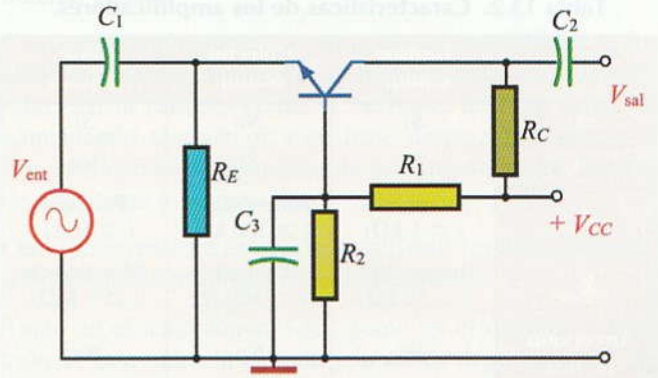


Figura 13.18. Amplificador de base común.

La ganancia de tensión de este amplificador es bastante buena, muy parecida a la del amplificador de emisor común.

También responde excelentemente a las frecuencias altas, por lo que constituye un buen amplificador de radiofrecuencia (RF). En los sistemas de recepción de RF el generador de señales es la propia antena del receptor. Ésta proporciona una señal muy débil y su impedancia característica es baja, de unos 50 Ω, lo que hace que la impedancia de entrada de un amplificador de BC se adapte perfectamente a ella. En la Figura 13.19, se muestra el circuito de un amplificador de radiofrecuencia con base común.

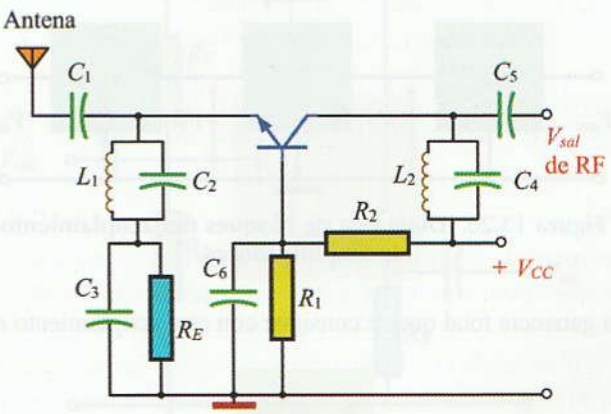


Figura 13.19. Amplificador de radiofrecuencia en configuración base común.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

13.2.4. Cuadro resumen de las características de los amplificadores

En la Tabla 13.2 se expone un cuadro comparativo de las diferentes características de los amplificadores en sus distintas configuraciones básicas.

Tabla 13.2. Características de los amplificadores.

	Emisor común	Colector común	Base común
A_v	Sí	No	Sí
A_i	Sí	Sí	No
Z_{ent}	Intermedia ($\cong$ 1 kΩ)	Muy grande ($\cong$ 300 kΩ)	Pequeña ($\cong$ 50 Ω)
Z_{sal}	Intermedia ($\cong$ 50 kΩ)	Pequeña ($\cong$ 300 Ω)	Muy grande ($\cong$ 1 MΩ)
Inversión de fase	Sí	No	No
Aplicaciones	Universal	Amplificador de aislamiento	Amplificador de RF

13.3 Acoplamiento de amplificadores

Normalmente la ganancia producida por una sola etapa amplificadora es insuficiente para producir la amplificación deseada. En estos casos se acoplan dos, tres o más etapas en cascada, tal como se indica en el diagrama de bloques de la Figura 13.20.

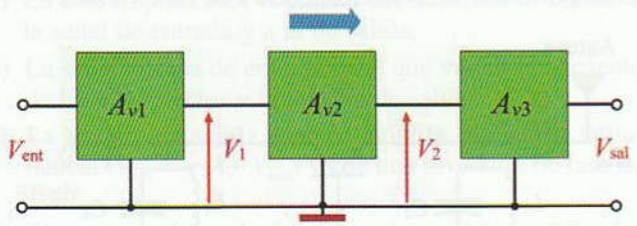


Figura 13.20. Diagrama de bloques del acoplamiento de amplificadores.

La ganancia total que se consigue con este acoplamiento es:

$$A_{vT} = \frac{V_{sal}}{V_{ent}}$$

Teniendo en cuenta que las ganancias que se consiguen en cada una de las etapas se calculan así:

$$A_{v1} = \frac{V_1}{V_{ent}} \quad , \quad A_{v2} = \frac{V_2}{V_1} \quad , \quad A_{v3} = \frac{V_{sal}}{V_2}$$

Operando, llegamos a la conclusión de que:

$$A_{vT} = A_{v1} A_{v2} A_{v3}$$

El resultado obtenido nos indica que la ganancia de un amplificador con varias etapas en cascada es igual al producto de las ganancias de cada una de ellas.

Actividad resuelta 13.4

Así, por ejemplo, si se acoplasen dos etapas en cascada que poseyeran una ganancia de 100 cada una, se conseguiría una ganancia en conjunto igual a:

$$A_{vt} = 100 \cdot 100 = 10.000$$

Para realizar este acoplamiento pueden utilizarse condensadores, transformadores, un acoplamiento directo y otros sistemas que estudiaremos a continuación.

13.3.1. Acoplamiento con condensador o RC

En la Figura 13.21 se muestra el acoplamiento de dos amplificadores de emisor común mediante el condensador C_2.

Esta forma de acoplamiento es válida cuando las señales de entrada son de corriente alterna. El condensador bloquea las señales de C.C. de un amplificador a otro y permite el paso de la señal de C.A. De esta forma, se consigue que las diferentes etapas queden aisladas en lo que se refiere a la C.C. y, así, se evita el desplazamiento de los puntos Q de funcionamiento del transistor de cada etapa.

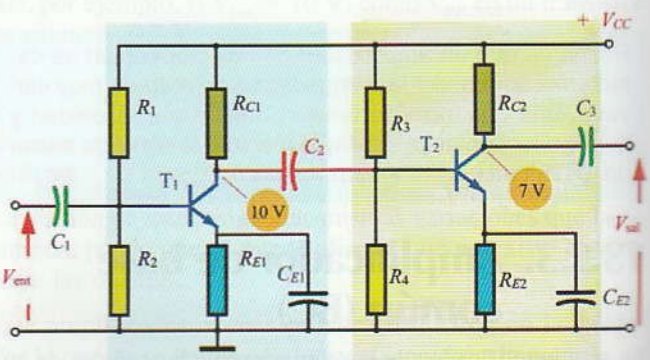


Figura 13.21. Acoplamiento de amplificadores con condensador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 13.5

Para entender mejor esto, tomemos como ejemplo el amplificador en cascada de la Figura 13.21. Al medir la tensión estática del colector de T_1, nos da una tensión de 10 V. Sin embargo, la tensión estática de la base de T_2 es algo inferior, unos 7 V. En este caso, cada uno de estos transistores posee un punto de funcionamiento independiente. Esto se consigue gracias al aislamiento que produce el condensador a la C.C.

En el caso de que se cortocircuite el condensador de acoplamiento C_2, la tensión de 10 V quedaría aplicada a la base de T_2, llevando a este transistor a la saturación y la respuesta de este último ya no sería lineal.

El tipo de condensadores que se suelen utilizar para este tipo de acoplamiento son los electrolíticos. Con ellos, se consigue un valor elevado de la capacidad; que resulta un aspecto de gran interés para reducir la reactancia de éstos a las bajas frecuencias de las señales de C.A. No obstante, este tipo de acoplamiento deja de ser ventajoso para frecuencias demasiado bajas, por lo que se puede afirmar que su aplicación es aceptable para frecuencias de señal de C.A. superiores a los 10 Hz.

13.3.2. Acoplamiento directo

En la Figura 13.22 se muestra un acoplamiento directo de dos etapas amplificadoras. Este tipo de acoplamiento se utiliza cuando la frecuencia de la señal es inferior a 10 Hz. Para estas frecuencias tan bajas, los condensadores tendrían que poseer una capacidad elevada; lo que es inviable en la mayoría de los casos.

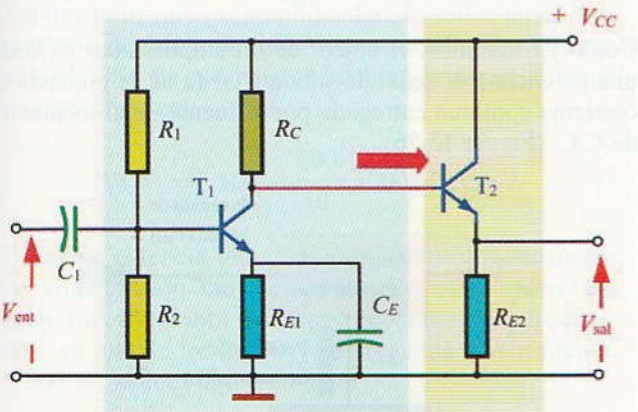


Figura 13.22. Acoplamiento directo de amplificadores.

El acoplamiento directo también se aplica para trabajar con señales de C.C., como es el caso de los instrumentos de medida y los osciloscopios, que en algunos casos operan con este tipo de corriente.

Estos amplificadores han de diseñarse de forma que las conexiones directas no desvíen los puntos de trabajo de cada transistor. Así, por ejemplo, en el amplificador de la Figura 13.22 hay que tener en cuenta que la tensión de emisor de T_1 es la misma que la base de T_2. Todas las etapas necesitan puntos de funcionamiento con tensiones comunes, lo que complica el diseño en los casos en que hay que acoplar muchas etapas.

Con este acoplamiento se aumenta la sensibilidad a los cambios de temperatura. Por ejemplo, si aumenta la temperatura en la primera etapa, la corriente de fuga se eleva, aumentando también β; esto hace desplazar el punto de funcionamiento del transistor de la siguiente etapa, haciendo al sistema muy inestable.

Otro inconveniente es que se amplifican las variaciones de tensión que se producen en la alimentación.

Tanto en el acoplamiento RC como en el directo, la relación de fase entre la entrada y la salida dependerá del número de etapas y del desfase que produzca cada una de ellas sobre la señal de entrada. Así, por ejemplo, en el caso de que todas las etapas estén en configuración EC, la salida estará en fase con la entrada para un número par de etapas, produciéndose un desfase de 180°, si es impar.

13.3.3. Amplificador Darlington

En la Figura 13.23, se muestra un procedimiento ampliamente utilizado para acoplar directamente dos transistores en configuración colector común. A este circuito se lo conoce como conexión Darlington. La ganancia de tensión

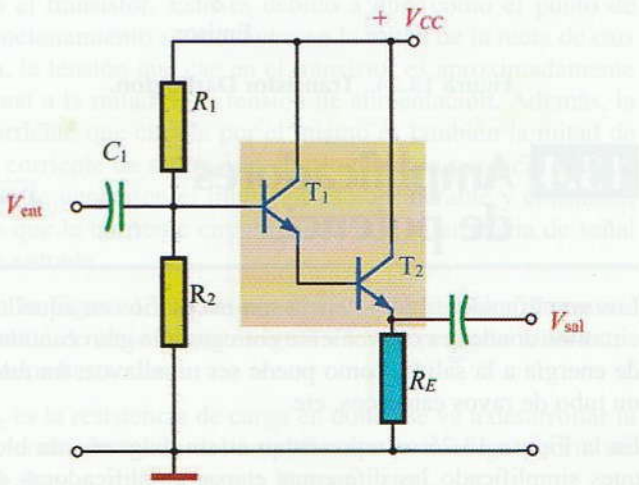


Figura 13.23. Amplificador Darlington.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

que se obtiene del conjunto es aproximadamente la unidad. Sin embargo, se consigue una gran ganancia de corriente, ya que ésta es aproximadamente igual al producto de las ganancias de cada uno de los transistores.

$$A_{i\,(\text{Darlington})} = \beta_1 \cdot \beta_2$$

Actividad resuelta 13.6

Así, por ejemplo, si los transistores de un par Darlington tienen una ganancia de 150 cada uno, se conseguirá una ganancia de conjunto igual a:

$$A_i = 150 \cdot 150 = 22.500$$

La gran ventaja de este circuito es que posee una impedancia de entrada muy grande y una impedancia de salida pequeña. Este hecho, unido a la gran ganancia de corriente, hace que este circuito sea de gran interés en aquellas aplicaciones en donde sea necesario aislar las fuentes de señal con impedancia elevada de las cargas con pequeña impedancia.

Las parejas de transistores que forman el circuito Darlington se suelen fabricar en una sola cápsula con sólo tres terminales, tal como se muestra en la Figura 13.24.

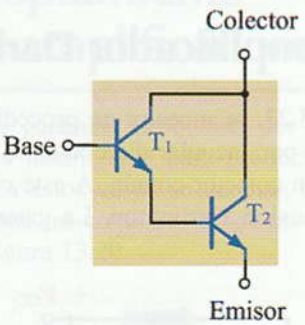


Figura 13.24. Transistor Darlington.

13.4 Amplificadores de potencia

Los amplificadores de potencia son necesarios en aquellos circuitos donde sea conveniente entregar una gran cantidad de energía a la salida, como puede ser un altavoz, un relé, un tubo de rayos catódicos, etc.

En la Figura 13.25 se representan en un diagrama de bloques simplificado las diferentes etapas amplificadoras de que se compone un equipo básico de audio.

Figura 13.25. Diagrama de bloques de un amplificador de audio.

El micrófono proporciona una pequeña señal de C.A. proporcional a las modulaciones de la presión sonora a él aplicada. Como esta señal es muy pequeña, se eleva posteriormente mediante dos etapas amplificadoras de pequeña señal y, por último, para poder excitar el altavoz, se aumenta la potencia de la misma mediante una etapa final amplificadora de potencia.

Las primeras etapas previas de amplificación poseen la función de elevar todo lo posible la pequeña tensión aplicada a ellas, por lo que han de tener una ganancia de tensión elevada. Sin embargo, en las etapas finales se trata de elevar la potencia de señal para que se pueda mover la membrana del altavoz. Para conseguirlo, se emplean los amplificadores de potencia.

En definitiva, un amplificador de potencia también es un amplificador de tensión, con la diferencia de que, debido a que la resistencia de la carga en las últimas etapas es bastante baja (como por ejemplo un altavoz de 4 Ω), las corrientes de colector han de ser más elevadas.

Los transistores utilizados para este tipo de amplificadores poseen una potencia nominal superior a los empleados en amplificadores de pequeña señal (para los primeros $P_N > 1/2$ W, para los segundos $P_N < 1/2$ W).

13.4.1. Rendimiento de un amplificador

Como ya sabemos, el objeto de un amplificador es ceder una potencia a la señal de salida a costa de la potencia de corriente continua entregada por la fuente de alimentación de C.C. (Figura 13.26).

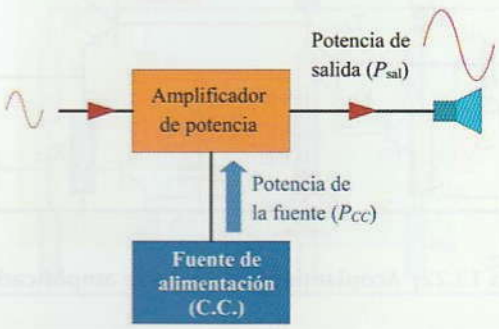


Figura 13.26. La fuente de alimentación proporciona energía para el amplificador de potencia.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En un amplificador de potencia es muy importante que la potencia que entrega la fuente sea aprovechada al máximo para conseguir la mayor potencia de señal de salida. Es decir, que el rendimiento de un amplificador se determina mediante la siguiente relación:

$$\eta\% = \frac{P_{sal}}{P_{CC}} 100$$

$\eta\%$ = Rendimiento en tantos por ciento.

P_{sal} = Potencia de la señal de salida.

P_{CC} = Potencia de C.C. cedida por la fuente.

Actividad resuelta 13.7

Así, por ejemplo, si para que el amplificador de la Figura 13.26 proporcione al altavoz una potencia de 10 W se necesita suministrar por la fuente 20 W, el rendimiento será entonces:

$$\eta\% = \frac{10 \text{ W}}{20 \text{ W}} \cdot 100 = 50\%$$

El rendimiento de un amplificador de potencia es mucho más importante que uno de pequeña señal.

Actividad resuelta 13.8

Supongamos que un amplificador de audio posee una potencia de salida de 200 W y un rendimiento de tan sólo el 10%. La potencia que deberá entregar la fuente en este caso será:

$$P_{CC} = \frac{P_{sal}}{\eta\%} 100 = \frac{200}{10} \cdot 100 = 2.000 \text{ W}$$

Para esta potencia tan grande, es necesario una fuente de alimentación muy voluminosa y cara; aparte del gran inconveniente de los calentamientos producidos, ya que de los 2.000 W entregados por la fuente, 1.800 W se convierten en calor.

Los amplificadores que hasta ahora hemos estudiado pertenecen a la clase A. Los amplificadores de potencia se suelen hacer trabajar en clase B y AB, para así aumentar el rendimiento de los mismos.

Seguidamente vamos a ocuparnos de los diferentes tipos de amplificadores de potencia.

13.4.2. Amplificadores de potencia clase A

Recordemos que un amplificador de clase A posee su punto de trabajo en el centro de la recta de carga, tal como se muestra en la Figura 13.27.

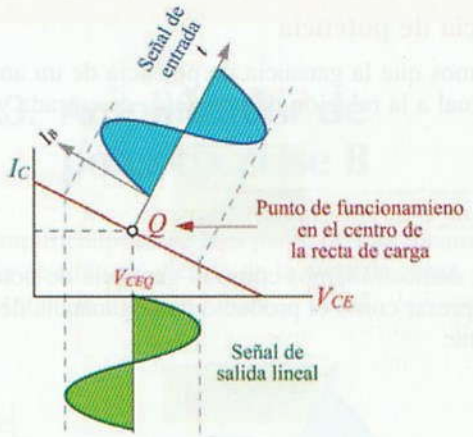


Figura 13.27. Punto de funcionamiento de un amplificador de clase A.

De esta manera se consigue una mínima distorsión, es decir, que la señal de salida sea de la misma forma que la de entrada. Sin embargo, este sistema de trabajo no es el más adecuado, ya que se pierde gran cantidad de potencia en el transistor. Esto es debido a que, como el punto de funcionamiento se encuentra en la mitad de la recta de carga, la tensión que cae en el transistor es aproximadamente igual a la mitad de la tensión de alimentación. Además, la corriente que circula por el mismo es también la mitad de la corriente de saturación. Por lo tanto, la potencia perdida que se genera en el transistor es considerable y constante, ya que la corriente circula por él aun en ausencia de señal de entrada.

En la Figura 13.28 se muestra un amplificador de emisor común de clase A que es igual a los de pequeña señal estudiados hasta ahora.

R_L es la resistencia de carga en donde se va a desarrollar la potencia de salida del amplificador (esta carga podría ser un altavoz, un motor, una lámpara, etc.).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

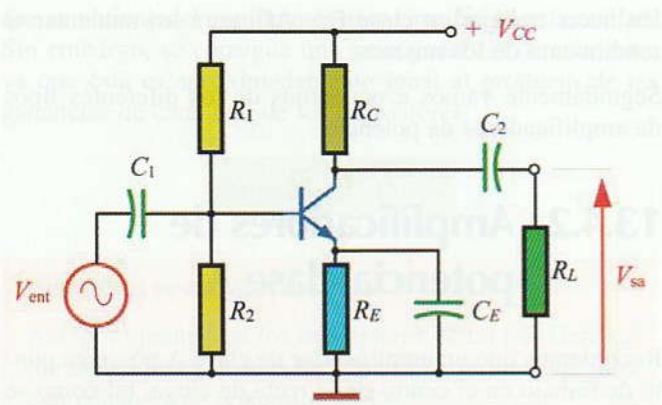


Figura 13.28. Amplificador de emisor común de clase A.

Ganancia de potencia

Recordemos que la ganancia de potencia de un amplificador es igual a la relación de potencias de entrada y salida:

$$A_p = \frac{P_{sal}}{P_{ent}}$$

Además, demostrábamos cómo la ganancia de potencia se podía expresar como el producto de la ganancia de tensión y corriente:

$$A_p = A_v \cdot A_i$$

Los amplificadores de potencia deben trabajar con tensiones y corrientes de gran magnitud; por ello, este tipo de amplificadores se diseñan para que proporcionen buenas ganancias de potencia.

Potencia en la carga

La potencia de C.A. (P_{sal}), que se desarrolla en la carga R_L, depende de la tensión V_L que aparezca en ella. Para calcularla se puede aplicar directamente la siguiente expresión:

$$P_{sal} = \frac{V_L^2}{R_L} \qquad \text{(I)}$$

Para aplicar esta fórmula correctamente hay que operar con valores eficaces de la tensión (recordemos que estos valores son los que mide un voltímetro de C.A.). En muchos casos interesa trabajar con los valores que mide un osciloscopio; es decir, con los picos máximos de la señal (V_p), o pico a pico (V_{pp}). Veamos cómo se relacionan estos valores con los eficaces:

El valor eficaz es igual a la tensión de pico partido por la raíz de dos

$$V_L = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \qquad \text{(II)}$$

Por otro lado, el valor pico máximo de esta tensión es la mitad que el pico a pico:

$$V_p = \frac{V_{pp}}{2} \qquad \text{(III)}$$

Sustituyendo los valores de las ecuaciones (II) y (III) en la (I), podemos comprobar que se obtiene la expresión:

$$P_{sal} = \frac{V_{pp}^2}{8\,R_L}$$

Actividad resuelta 13.9

Se mide mediante un osciloscopio la tensión pico a pico en el altavoz de 4 Ω de un amplificador de potencia, dando como resultado 20 V. Determina la potencia en dicho altavoz.

Solución: El altavoz hace las veces de carga de la etapa final de potencia del amplificador. La potencia de salida será en este caso:

$$P_{sal} = \frac{V_{pp}^2}{8\,R_L} = \frac{20^2}{8 \cdot 4} = 12{,}5 \text{ W}$$

Potencia perdida en el transistor

En ausencia de señal, el transistor pierde una potencia que debe disipar en forma de calor. Esta potencia es ocasionada por la tensión estática (V_{CEQ}) entre el colector y el emisor y por la corriente estática (I_{CQ}) del colector, que aparecen en el punto de trabajo Q del mismo:

$$P_p = V_{CEQ} I_{CQ}$$

Como ya es sabido, esta potencia no debe superar, en ningún caso, la potencia máxima permitida por el transistor, que se indica en las hojas de especificaciones técnicas facilitadas por el fabricante.

Actividad resuelta 13.10

En la Figura 13.29 se muestra un amplificador de emisor común, donde $\beta = 200$. Al realizar un ensayo se obtiene que la tensión pico a pico máxima que se detecta en la salida sin distorsión es de 2,34 V, siendo 50 mV la aplicada a la entrada. Determina A_v, A_p, $P_{sal\,(máx)}$, P_{CC} y $\eta\%$.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución: Según las tensiones de entrada y salida sin distorsión, obtenidas en el ensayo, la ganancia de tensión es:

$$A_v = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{2{,}34}{0{,}05} = 46{,}8$$

La ganancia de potencia será igual al producto de las ganancias de corriente y tensión:

$$A_p = A_v A_i = 46{,}8 \cdot 200 = 9.360$$

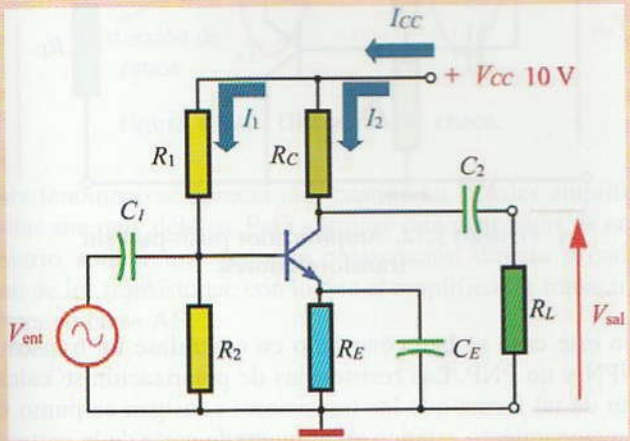


Figura 13.29.

La potencia máxima en la carga de 750 Ω es:

$$P_{sal\,(máx)} = \frac{V_{pp}^2}{8\,R_L} = \frac{2{,}34^2}{8 \cdot 750} = 9{,}13 \cdot 10^{-4}\ \text{W} = 913\ \mu\text{W}$$

Ahora calculamos la potencia total tomada de la fuente de alimentación. Para ello, primero hay que determinar las corrientes que consume el circuito.

La corriente que fluye por el divisor de tensión es:

$$I_1 = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{10}{10.000 + 2.200} = 0{,}00082\ \text{A}$$

y la corriente que consume el circuito del colector es:

$$I_2 = I_{CQ}$$

Para calcular esta corriente, calculamos primero la del emisor, ya que $I_{CQ} \cong I_E$:

$$V_B = R_2 I_1 = 2.200 \cdot 0{,}00082 = 1{,}8\ \text{V}$$

$$V_E = V_B - 0{,}7\ \text{V} = 1{,}8 - 0{,}7 = 1{,}1\ \text{V}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1{,}1}{1.000} = 0{,}0011\ \text{A} \cong I_2$$

La corriente que suministra la fuente es entonces:

$$I_{CC} = I_1 + I_2 = 0{,}00082 + 0{,}0011 = 0{,}00192\ \text{A}$$

La potencia suministrada por la fuente es:

$$P_{CC} = V_{CC} I_{CC} = 10 \cdot 0{,}00192 = 0{,}0192\ \text{W}$$

El rendimiento de este amplificador es:

$$\eta\% = \frac{P_{sal\,(máx)}}{P_{CC}}\,100 = \frac{913 \cdot 10^{-6}}{0{,}0192} \cdot 100 = 4{,}76\%$$

Este rendimiento es demasiado bajo para un amplificador de potencia; por esta razón, se emplean mucho más los amplificadores de potencia de clase B, que mejoran el rendimiento.

13.4.3. Amplificador de potencia clase B

En un amplificador clase B el punto de funcionamiento del transistor se sitúa en el corte de la recta de carga, tal como se muestra en la Figura 13.30.

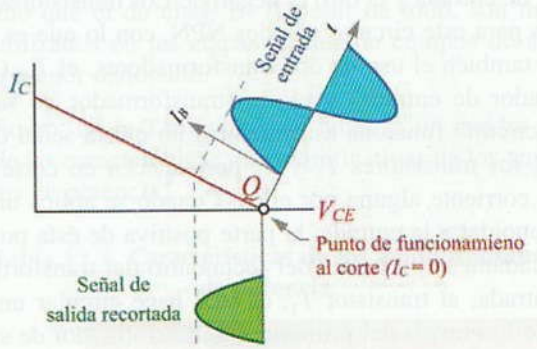


Figura 13.30. Punto de funcionamiento de un amplificador de clase B.

Para conseguir este punto de operación, la polarización de la unión base emisor debe ser nula. En consecuencia, el transistor no comenzará a conducir hasta que la señal de entrada proporcione la polarización adecuada. Con esta forma de trabajo se consigue eliminar el consumo constante de potencia suministrado por la fuente de alimentación, por lo que el rendimiento aumenta considerablemente. Sin embargo, se presenta un inconveniente: la tensión que aparece en la salida es únicamente la correspondiente a los semiciclos positivos de la señal de entrada y, en consecuencia, la distorsión que se produce es muy grande.

La forma de evitar el problema de la distorsión es utilizar dos transistores en contrafase o en conexión «push-pull».

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Circuito push-pull

En la Figura 13.31 se muestra un amplificador de potencia push-pull que trabaja en clase B.

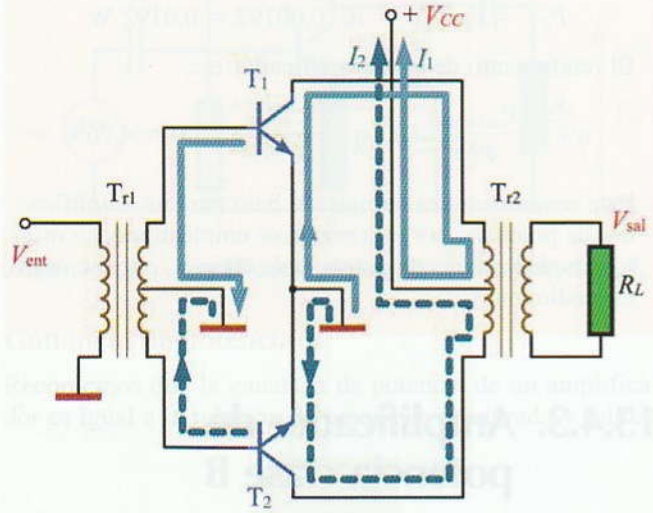


Figura 13.31. Amplificador push-pull de clase B.

Uno de los transistores amplifica la mitad positiva de la señal de entrada y el otro la negativa. Los transistores utilizados para este circuito son dos NPN, con lo que es necesario también el uso de dos transformadores, el T_{r1} (transformador de entrada) y el T_{r2} (transformador de salida). Este circuito funciona así: mientras no exista señal de entrada, los transistores T_1 y T_2 permanecen en corte y no fluye corriente alguna por ellos. Cuando se aplica una señal senoidal a la entrada, la parte positiva de ésta polariza adecuadamente, a través del secundario del transformador de entrada, al transistor T_1, el cual hace circular una corriente I_1 a través del primario del transformador de salida. En el secundario de este transformador aparece entonces el semiciclo positivo de la señal de salida. Mientras tanto, el transistor T_2 permanece en corte.

En el siguiente semiciclo, cuando se invierte la señal alterna aplicada a la entrada, en el secundario de T_{r1} aparece el semiciclo negativo, que hace que el transistor T_1 entre en corte y el T_2 se polarice correctamente, proporcionando una corriente I_2 al transformador de salida que, a su vez, produce la aparición del semiciclo negativo amplificado en la salida. En conclusión, este circuito amplifica la señal de entrada completa.

Existen otros circuitos push-pull que evitan el uso de transformadores. En la Figura 13.32 se muestra un ejemplo de uno de ellos:

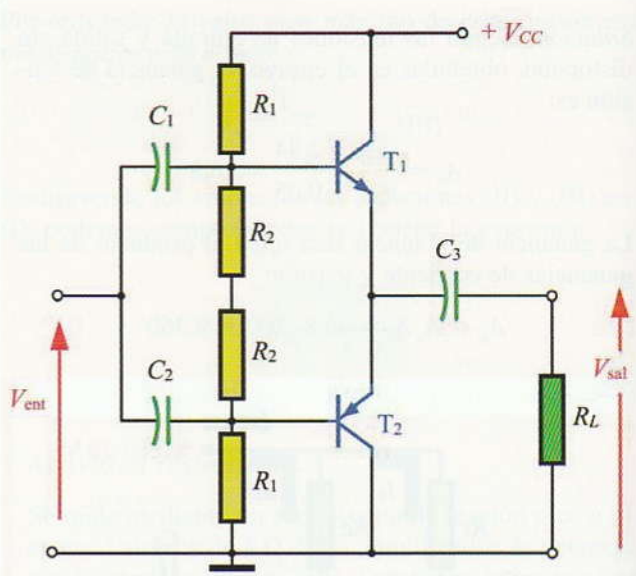


Figura 13.32. Amplificador push-pull sin transformadores.

En este caso se han conectado en contrafase un transistor NPN y un PNP. Las resistencias de polarización se calculan de tal forma que los transistores consigan su punto de funcionamiento estático en el punto de corte de la recta de carga. Además, existe una simetría en el circuito de polarización que hace que la caída de tensión en cada uno de los transistores sea la mitad de la tensión de alimentación. Los condensadores C_1 y C_2 desacoplan la componente continua de la señal de entrada y el C_3 aísla la señal de salida de la tensión continua de la fuente de alimentación.

Debido a que los dos transistores trabajan en configuración emisor común, este amplificador presenta una impedancia alta a la entrada y muy baja a la salida, lo que le hace ideal para funcionar en etapas finales de audio, donde los altavoces presentan una impedancia de 4 a 8 ohmios.

Este tipo de amplificador se emplea mucho en sistemas de potencia. Sin embargo, produce todavía una cierta distorsión, que puede ser excesiva para ciertas aplicaciones.

Distorsión de cruce

Ya se ha dicho que en un amplificador de clase B los transistores carecen de polarización, para poder estar en corte hasta que no se aplique la señal de entrada. Pero hay que tener en cuenta que un transistor no comienza a conducir plenamente hasta que no se le aplica la tensión umbral, de unos 0,7 V para el silicio, a la unión formada por el emisor y la base. Por todo ello, cuando la señal de entrada sea inferior a 0,7 V, no circulará corriente por uno de los tran-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

sistores. De la misma forma, el otro transistor no saldrá del corte hasta que la tensión del semiciclo negativo sea −0,7 V. Este hecho provoca una distorsión que deforma la señal en el instante en que un transistor deja de conducir y el otro comienza a hacerlo, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 13.33.

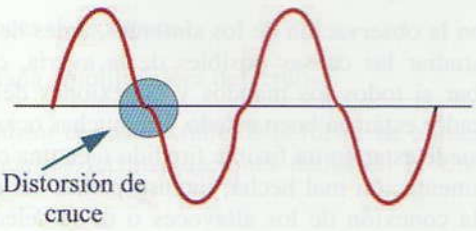


Figura 13.33. **Distorsión de cruce.**

Este fenómeno se aprecia más cuando las señales amplificadas son muy débiles. Para eliminar esta distorsión, es necesario aplicar una pequeña polarización directa a cada uno de los transistores, con lo que el amplificador trabajará ahora en clase AB.

13.4.4. Amplificador de potencia clase AB

En la Figura 13.34, se puede apreciar cómo el punto de trabajo de un amplificador de clase AB se encuentra entre el corte y el centro de la recta de carga.

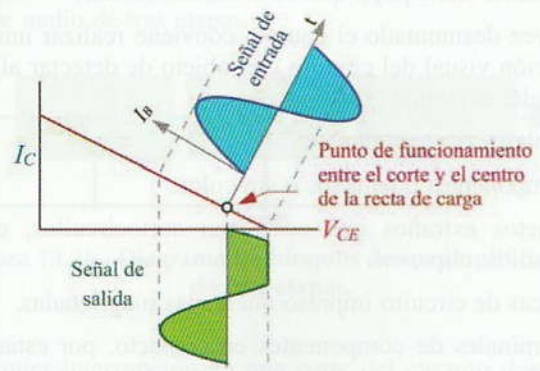


Figura 13.34. **Punto de trabajo de un amplificador de clase AB.**

En la Figura 13.35, se muestra el circuito de un amplificador de potencia de clase AB.

Con este amplificador se consigue un punto de funcionamiento muy próximo al corte, gracias a la pequeña polarización directa aplicada a la unión emisor-base. Así, se consigue que el punto de trabajo de este amplificador esté situado entre el A y el B.

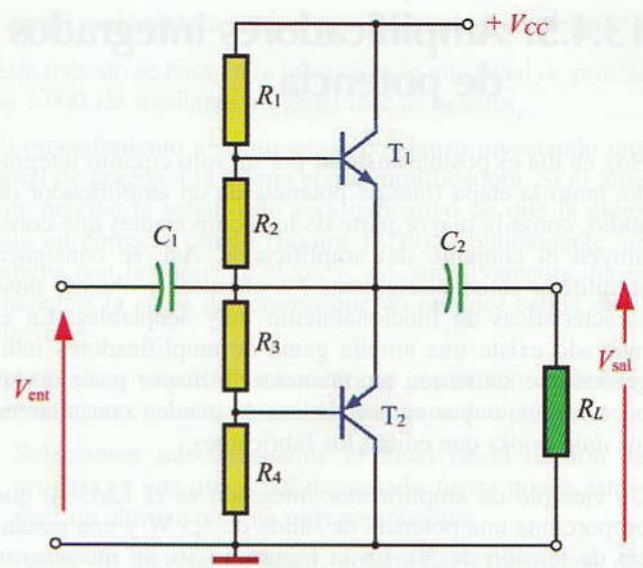


Figura 13.35. **Amplificador de potencia de clase AB.**

El rendimiento de este tipo de amplificadores es algo más pequeño que el de clase B. A pesar de todo, son mucho más utilizados en las etapas finales de equipos de audio, por su menor distorsión.

Por último, en la Tabla 13.3, se muestra un cuadro resumen de las características más significativas de los amplificadores de potencia.

Tabla 13.3. **Características de los amplificadores de potencia.**

	Clase A	Clase B	Clase AB
Distorsión	Muy pequeña.	Elevada.	Pequeña.
Rendimiento	Hasta el 50%.	Hasta el 78,5%.	Entre las clases A y B.
Polarización del diodo emisor	Directo (en el centro de la recta de carga).	Ninguna (transistores en corte).	Directa (cerca del corte).
Aplicaciones	Amplificadores de pequeña señal y en algunos amplificadores de audio de pequeña potencia.	No se utilizan en equipos de audio por su gran distorsión. Amplificadores de gran potencia.	Etapas finales de potencia en equipos de audio.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

13.4.5. Amplificadores integrados de potencia

Hoy en día es posible sustituir por un solo circuito integrado, tanto la etapa final de potencia de un amplificador de audio, como la mayor parte de los componentes que constituyen el conjunto del amplificador. Así, se consiguen simplificar satisfactoriamente los circuitos y obtener unas características de funcionamiento muy aceptables. En el mercado existe una amplia gama de amplificadores integrados que satisfacen ampliamente la mayor parte de las necesidades, cuyas características se pueden consultar en los *data books* que editan los fabricantes.

Un ejemplo de amplificador integrado es el LM384, que proporciona una potencia de salida de 5,5 W y una ganancia de tensión de 50. En la Figura 13.36, se muestra un ejemplo de aplicación de este tipo de amplificador integrado, en el que se puede apreciar la pequeña cantidad de componentes que se necesitan para completar el circuito.

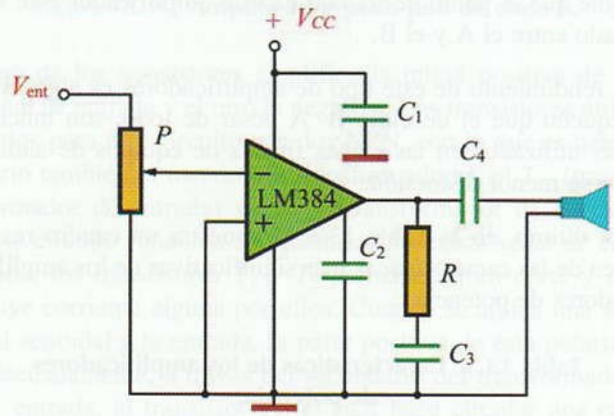


Figura 13.36. Amplificador integrado LM384.

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del amplificador integrado LM384.

13.5 Localización de averías y reparación en un amplificador

Los pasos a seguir para reparar un amplificador son similares para todos los tipos. Lo principal es conocer el funcionamiento básico de los circuitos y la experiencia será la que dicte, en cualquier caso, cuál será el método más adecuado a seguir.

Para localizar una avería hay que seguir siempre los siguientes pasos:

a) Observar los síntomas que provoca el mal funcionamiento.

b) Estudiar las posibles causas de la avería.

c) Reducir las posibilidades.

Junto con la observación de los síntomas, antes de comenzar a estudiar las causas posibles de la avería, conviene comprobar si todos los mandos y conexiones del equipo amplificador están en buen estado. En muchas ocasiones la avería puede estar en un fusible fundido o en una conexión de la alimentación mal hecha; incluso podría ser debida a una mala conexión de los altavoces o de la selección de entrada de señales (micrófono, giradiscos, pletina, etc.). Para realizar estas comprobaciones, es necesario dedicar tan sólo unos minutos. Merece la pena esta inversión de tiempo, antes de desmontar el aparato de su caja.

En el caso de que sea necesario desmontar el aparato, conviene seguir unas mínimas medidas de seguridad, como son:

- Desenchufar el equipo de la red.
- Una vez desenchufado, accionar el interruptor de puesta en marcha del equipo durante un pequeño tiempo. Así, se descargarán los condensadores electrolíticos y se evitarán descargas molestas.
- Seguir las instrucciones de desmontaje señaladas en los manuales por el fabricante. Así, evitaremos errores que puedan ocasionar nuevas averías.
- Emplear herramientas adecuadas para cada operación.
- Ordenar y guardar las piezas de sujeción y demás componentes del equipo que se desea desmontar.

Una vez desmontado el equipo, conviene realizar una exploración visual del circuito con objeto de detectar alguna anomalía evidente, como pueden ser:

- Cables y componentes rotos.
- Componentes quemados o sin color.
- Objetos extraños que ocasionan cortocircuitos, como tornillos, clips, etc.
- Placas de circuito impreso quemadas o agrietadas.
- Terminales de componentes en contacto, por estar doblados.

En caso de no encontrar la causa de la avería, habrá que observar los síntomas. Estos pueden ser:

- Ausencia de señal de salida.
- Señal de salida débil.
- Distorsión y ruido en la señal de salida.

Comencemos por el primero.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

13.5.1. Ausencia de señal de salida

La falta de salida en un amplificador puede ser debida a:

- Un fallo en la fuente de alimentación.
- Altavoces defectuosos.
- Una etapa amplificadora defectuosa.

Para localizar el posible fallo de la fuente de alimentación, seguiremos las recomendaciones dadas en la Unidad didáctica 8.

Para comprobar si un altavoz está defectuoso, es suficiente con conectar una pila de 1,5 V en sus bornes (Figura 13.37). En el caso de que el altavoz esté en buen estado, emitirá un pequeño sonido. Esta comprobación también se puede realizar con el polímetro utilizado como óhmetro, aprovechando la pila que éste lleva en su interior.

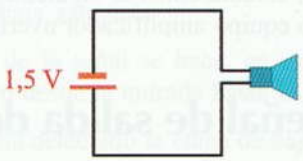


Figura 13.37. Verificación de un altavoz.

En el caso de que el altavoz y la fuente de alimentación se encuentren en buen estado, habrá que encontrar la avería en alguna de las etapas del amplificador. En la Figura 13.38 se muestra el diagrama de bloques de un amplificador de audio de tres etapas.

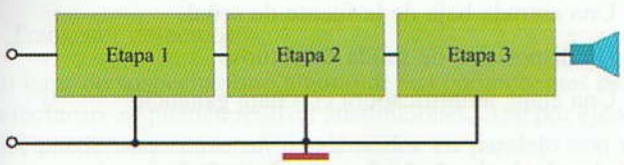


Figura 13.38. Diagrama de bloques de un amplificador de tres etapas.

Cualquier interrupción en una parte del circuito dejará la salida sin señal. El método a seguir, en este caso, para localizar la avería es encontrar la etapa defectuosa y aislarla para determinar, posteriormente, el fallo de algún componente de ésta. Para realizar esta operación, se pueden utilizar dos métodos:

- Por inyección de la señal.
- Por seguimiento de la señal.

Localización de averías por inyección de señal

Este método se basa en la inyección de una señal de prueba de 1.000 Hz mediante un generador de señales.

El procedimiento a seguir es: se comienza inyectando una señal de prueba a la última etapa amplificadora. Si el altavoz percibe la señal, esto será indicativo de que la etapa está en correcto estado (Figura 13.39). Seguidamente, se prueba con la siguiente etapa y, así, sucesivamente, hasta encontrar la etapa defectuosa que no produce salida en el altavoz.

Para realizar esta comprobación con corrección, es conveniente tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- Seleccionar adecuadamente el nivel de la tensión de prueba, ya que una señal demasiado fuerte puede estropear un altavoz o algún otro componente.
- Antes de inyectar la señal, comprobar el esquema del circuito. Así, evitaremos conexiones incorrectas. En ciertos circuitos el chasis no se utiliza como masa del circuito, por lo que sería erróneo conectar el cable de masa del generador al chasis.

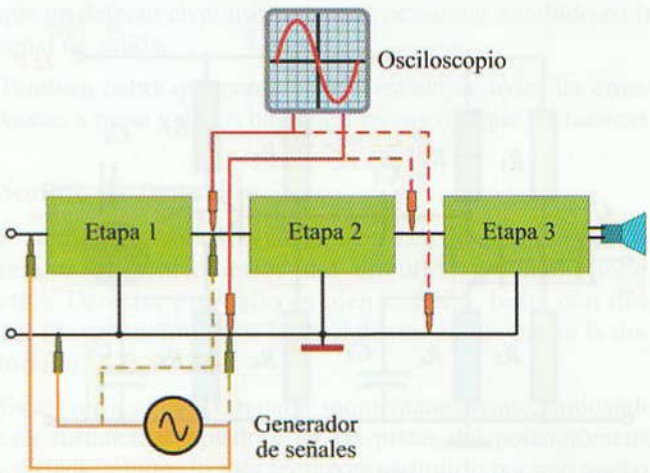


Figura 13.39. Localización de averías en un amplificador por inyección de señal.

Localización de averías por seguimiento de la señal

Para seguir este método, es necesario un polímetro o un osciloscopio. Consiste en ir comprobando si la señal aparece después de cada una de las etapas, realizando esta operación desde la primera hasta la última etapa. El fallo estará en aquella etapa amplificadora que no proporcione señal de salida.

Para conseguir buenos resultados con este método es muy importante seleccionar para cada circuito la sensibilidad adecuada del aparato de medida destinado al seguimiento

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

de la señal. Así, por ejemplo, si las señales son de radiofrecuencia habrá que utilizar un osciloscopio que sea capaz de medir altas frecuencias. Por todo ello, es muy importante conocer el origen de la señal antes de comenzar con las medidas.

Una vez que se ha determinado cuál es la etapa averiada, el siguiente paso será encontrar el componente o componentes defectuosos de la misma. El método más utilizado para estos casos es el análisis de tensión.

Localización de averías por análisis de tensión

Este método se basa en ir comprobando todas las tensiones que aparecen en los diferentes puntos del circuito de la etapa amplificadora defectuosa. Las tensiones correctas las suele indicar el fabricante en los esquemas. Una vez detectada la tensión incorrecta, habrá que aplicar las leyes de los circuitos para determinar el componente averiado. Veamos seguidamente un ejemplo:

En la Figura 13.40 se muestra un amplificador de dos etapas, acoplado por condensador.

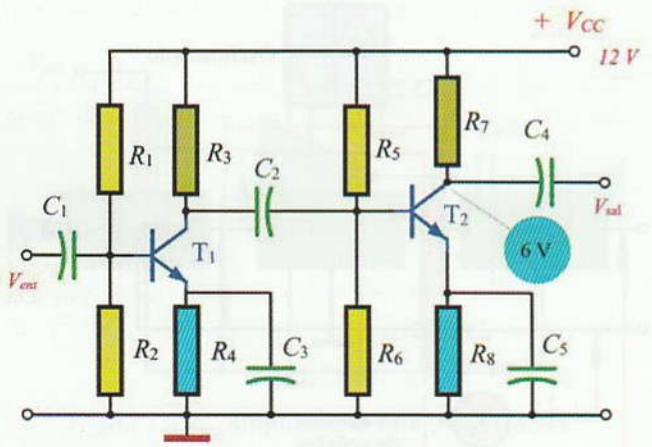


Figura 13.40. Amplificador de dos etapas acoplado por condensador.

Supongamos que en el colector del transistor T_2 se miden 12 V respecto a masa y, sin embargo, el fabricante indica que esta tensión debe ser de 6 V. Si toda la tensión de la fuente aparece en el colector, será porque por R_7 no fluye corriente alguna, ni por el transistor. Lo que nos indica que T_2 está en corte. Esta avería puede estar causada por los siguientes componentes:

- El transistor puede estar estropeado.
- R_5 puede estar abierta. Con lo cual se despolariza la base de T_2 y éste entra en corte. Esto se puede comprobar midiendo la tensión en la base, que será cero si R_5 está efectivamente abierta.
- R_6 puede estar cortocircuitada. Esto es muy poco probable, pero de ser así, desaparece la tensión de polarización y el transistor entra en corte. En este caso también la tensión de base es cero.
- R_8 puede estar abierta. En este caso la tensión de 12 V de la alimentación aparecerá en los bornes de dicha resistencia.

En conclusión, lo más importante para localizar el componente estropeado es conocer cómo opera el circuito y las leyes que se dan en él.

También se da la posibilidad de que exista una avería en el circuito de la señal de C.A. que interrumpa la evolución de ésta sin modificar sustancialmente las tensiones de C.C. Este tipo de averías pueden ser causadas por:

- Condensadores de acoplamiento abiertos.
- Transformadores de acoplamiento defectuosos.

Para encontrar el componente averiado, lo más habitual es emplear la inyección o seguimiento de la señal.

A continuación, estudiaremos el siguiente síntoma que se puede dar en un equipo amplificador averiado.

13.5.2. Señal de salida débil

Este síntoma es fácil de apreciar en un equipo de audio.

Los altavoces producen un sonido muy débil aunque se sitúe el potenciómetro de volumen al máximo.

Antes de comenzar con ninguna comprobación compleja, conviene realizar todas las inspecciones rutinarias descritas al comienzo de este apartado.

Una señal de salida débil puede ser debida a:

- Una entrada baja de la fuente de señal.
- Un dispositivo de salida defectuoso.
- Una etapa amplificadora con baja ganancia.

Entrada baja de la fuente de señal

La entrada baja puede ser ocasionada por un deterioro en el micrófono, cápsulas fonocaptoras del giradiscos, etc. Para comprobar si la avería es causada por estos elementos, es suficiente con probar con otras fuentes de señal o con un generador de señales de prueba.

Dispositivo de salida defectuoso

En un equipo de audio el dispositivo de salida es el altavoz. Éste puede haberse estropeado y haber aumentado su impedancia. Una forma de comprobarlo puede ser la de sustituir el altavoz del equipo por otro de las mismas ca-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

racterísticas. También se puede sustituir el altavoz por una carga resistiva conocida.

Etapa amplificadora con baja ganancia

En el caso de que la señal de entrada y el dispositivo de salida funcionen correctamente, la avería puede estar causada por una o varias etapas que proporcionan una ganancia más baja de la especificada.

La localización de una avería de este tipo es un poco más complicada que cuando existe una interrupción de señal. Para ello, se necesita conocer muy bien el circuito y saber previamente cómo responde cada etapa. En estos casos, los esquemas y boletines de asistencia técnica serán de una gran ayuda, ya que suelen incluir en la información diagramas de las ondas que deben aparecer en un osciloscopio en las distintas partes del circuito.

En el caso de tratarse de amplificadores estéreos, el método es más simple, ya que existen dos circuitos idénticos, uno para cada canal, que podrán ir comparando hasta dar con la etapa de baja ganancia.

El seguimiento de la señal se hace, en cualquiera de los casos, avanzando desde la entrada hasta la salida.

Una vez que se ha detectado la etapa de baja ganancia, hay que localizar cuál de sus componentes es el que está defectuoso. Las causas que pueden llegar a provocar baja ganancia son:

- Condensador de paso abierto.
- Condensador de acoplamiento defectuoso.
- Tensión de alimentación inferior a la normal.
- Transistor mal polarizado.
- Transistor defectuoso.

En caso de sospechar que alguno de los componentes está defectuoso, se pueden realizar sustituciones. Así, por ejemplo, puede conectarse un condensador en paralelo con el que se cree que está abierto. Si la ganancia se mejora, será prueba de que éste era el causante de la avería. Este método no se podrá realizar en aquellos casos en que las tensiones del circuito sean elevadas, ya que pueden ocasionar accidentes indeseables.

13.5.3. Distorsión y ruido en la señal de salida

Este síntoma se caracteriza por un ruido desagradable que aparece en los altavoces de salida. La señal de salida se presenta distorsionada debido a algún fallo del circuito.

Los ruidos que se pueden presentar en un amplificador de audio son muy variados. Si aprendemos a distinguirlos, será más fácil localizar la avería. Estos ruidos pueden ser:

- Zumbido.
- Sonido de frotación.
- Ruido constante (como de fritura o silbante).

Zumbido

Este ruido puede aparecer ocasionado por las siguientes causas:

- Rizado excesivo de la fuente de alimentación.
- Rotura de alguna conexión a masa.
- Cable apantallado defectuoso.

Para encontrar los fallos producidos por un excesivo rizado, es conveniente realizar medidas con el osciloscopio en los diferentes puntos de la alimentación.

Los cables apantallados se utilizan para evitar que se induzcan en los mismos señales de la frecuencia alterna de la red. Conviene comprobar el trenzado de estos cables, ya que un defecto en el mismo puede ocasionar zumbido en la señal de salida.

También habrá que comprobar el estado de todas las conexiones a masa y de los blindajes, en caso de que los hubiese.

Sonido de frotación

El sonido de frotación suele estar ocasionado por los diferentes potenciómetros del circuito (volumen, tono, etc.). Detectar este fallo es bien sencillo, basta con mover los potenciómetros hasta detectar el que causa la distorsión.

Esta avería se puede reparar momentáneamente, aplicando una sustancia limpiadora en las pistas del potenciómetro averiado, aunque lo más seguro es sustituirlo por uno nuevo.

Ruido constante

Este ruido puede ser debido a un transistor o circuito integrado defectuoso. Para localizar este tipo de averías, es de gran utilidad el método de inyección y seguimiento de una señal de prueba.

En ocasiones el ruido puede ser debido a una polarización inadecuada que distorsiona la señal (distorsión de cruce, recortamiento de la señal, etc.). En estos casos se inyecta una señal triangular, ya que es más fácil detectar una distorsión en ella.

Con estas consideraciones, ya nos podemos hacer una idea general de cómo son los procesos que se siguen para la localización de averías de un amplificador de audio.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

13.1 Verificación de un amplificador. Consigue un amplificador de audio comercial y, con el esquema del circuito, identifica las diferentes etapas amplificadoras, así como los aspectos más significativos del mismo: características técnicas, posibilidades de conexión, etc.

Figura 13.41.

Prueba del circuito: Consigue un elemento para aplicar una señal de entrada al amplificador, como, por ejemplo, un reproductor de discos, un magnetófono, un sintonizador, o un simple micrófono. Además necesitarás un altavoz para conectar a la salida del amplificador. Así, podrás probar si el funcionamiento del amplificador y todos sus controles son correctos.

Verificación del circuito amplificador: Esta prueba consistirá en introducir una señal de audiofrecuencia por una de las entradas e ir comprobando mediante el osciloscopio las modificaciones que se dan en la misma al transcurrir por los diferentes circuitos y llegar a la salida. Esta señal no podrá ser proporcionada por un magnetófono o por un plato, debido a que sus variaciones de nivel de frecuencia son difíciles de fijar. Por esta razón, es necesario inyectar una señal que sea fácil de medir y con una frecuencia fija, como puede ser la proporcionada por un generador de señales de baja frecuencia. La señal empleada para estos casos es la senoidal, con una frecuencia de 1.000 Hz (un buen oído humano es capaz de percibir señales desde 20 Hz hasta 20 kHz). La señal de 1.000 Hz cubre parte de las bajas frecuencias y de las altas.

El altavoz que normalmente se conecta a la salida del amplificador conviene que sea sustituido por una resistencia óhmica que posea los mismos valores de impedancia y potencia. Así evitaremos los ruidos molestos que emitiría dicho altavoz.

Una vez hechas estas consideraciones previas, inyecta a la entrada del amplificador una señal senoidal de 1.000 Hz y 3 mV y, con el osciloscopio, comprueba el nivel de la señal en las diferentes etapas amplificadoras. Una vez hecho esto, eleva el nivel de la señal de entrada hasta provocar la distorsión de dicha señal en la salida y anota los resultados, comprobando la relación de fase de las diferentes etapas, así como la ganancia y el nivel de distorsión.

13.2 Verificación de un amplificador de emisor común. Consigue el circuito de un amplificador de emisor común, o en su defecto monta en el entrenador didáctico o en una placa de circuito impreso el circuito que se muestra en la Figura 13.42.

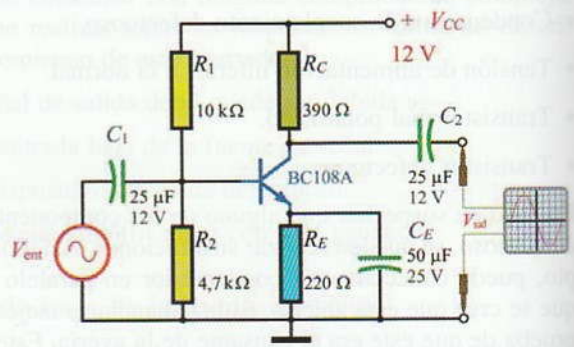


Figura 13.42.

Antes de realizar la verificación experimental del circuito, determina teóricamente los siguientes valores que se dan en el circuito: V_B, V_C, V_E, V_{CE}, así como la ganancia de tensión con el condensador de paso y sin él.

Seguidamente, comprueba mediante un voltímetro si los valores calculados anteriormente, de una forma teórica coinciden aproximadamente con los resultados de las medidas obtenidas en el circuito.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Una vez hecho esto, mediante un generador de señales, inyecta a la entrada del amplificador una señal senoidal de bajo nivel y de 1 kHz. Con un osciloscopio, visualiza la señal de salida en el canal B y la de entrada en el A, ajustando el nivel de entrada de dicho generador de señales hasta obtener una señal de salida sin distorsión.

Ahora, dibuja los oscilogramas obtenidos, comprobando el desfase entre las señales de entrada y salida. Determina la ganancia de tensión. Retira el condensador de paso y comprueba el efecto producido sobre la ganancia.

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del transistor BC108A.

13.3 Acoplamiento de amplificadores. Se trata de comprobar la respuesta de un amplificador de dos etapas acopladas mediante RC, para posteriormente comparar los resultados obtenidos con un acoplamiento directo.

Para empezar, consigue un amplificador constituido por dos etapas en emisor común acopladas mediante RC, identificando la situación y función de cada uno de los componentes del circuito. En su defecto, monta en el entrenador didáctico el circuito que se sugiere en la Figura 13.43.

Al igual que se hizo para la Actividad 13.2 mediante un generador de señales, inyecta a la entrada del amplificador una señal senoidal de bajo nivel y de 1 kHz. Con un osciloscopio, visualiza la señal de salida en el canal B y la de entrada en el A, ajustando el nivel de entrada de dicho generador de señales hasta obtener una señal de salida sin distorsión.

Seguidamente, dibuja los oscilogramas obtenidos, comprobando el desfase entre las señales de entrada y salida. Ahora, conecta el canal B del osciloscopio a la salida de la primera etapa amplificadora. Dibuja los oscilogramas y determina la ganancia de tensión en la primera etapa y en el conjunto.

En estas condiciones, comienza a reducir la frecuencia de la señal de entrada hasta valores inferiores a 10 Hz. Comprueba hasta qué frecuencia el amplificador mantiene la señal en la salida sin distorsión.

Ahora, cortocircuita el condensador de acoplamiento C_2, con lo que los amplificadores quedarán acoplados directamente. Repite todas las medidas realizadas anteriormente para este tipo de acoplamiento, comparando los resultados obtenidos. Por último, indica las ventajas e inconvenientes que observas en cada una de estas dos técnicas de acoplamiento de amplificadores.

13.4 Circuito para riego automático. Se trata de un circuito electrónico capaz de poner en marcha de forma automática el riego de un jardín cuando éste se encuentra con un determinado grado de sequedad. En la Figura 13.44 se muestra el esquema del circuito mencionado.

Su funcionamiento es como sigue: en el terreno a regar se introducen dos electrodos en forma de varillas (A y B) de acero separadas entre sí unos centímetros, de tal forma que se puedan detectar los cambios de humedad gracias a las modificaciones de resistencia óhmica que se dan en el terreno. En condiciones de poca humedad, la resistencia óhmica que se presenta entre los electrodos se hace elevada, lo que hace que el potencial de la base del transistor T_1 no sea lo suficientemente positivo como para hacer

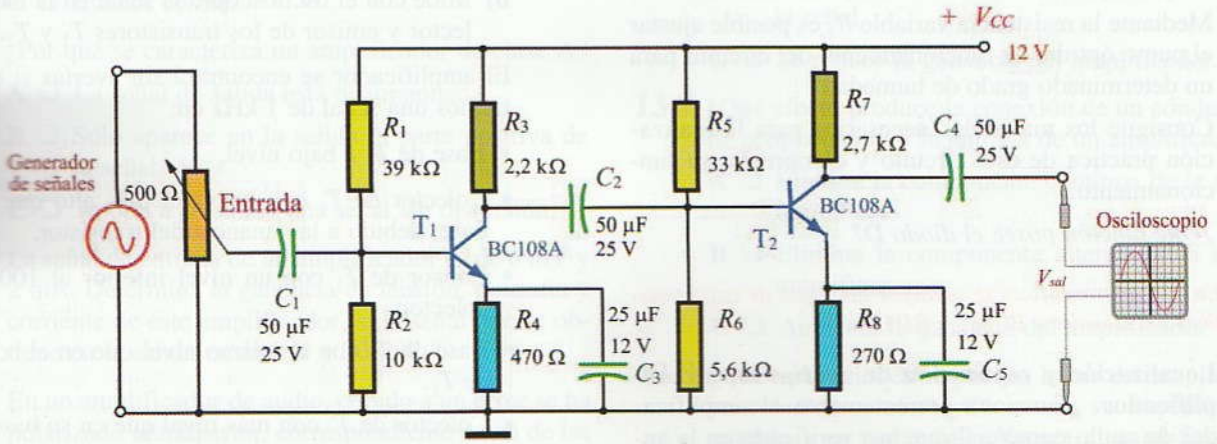


Figura 13.43.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

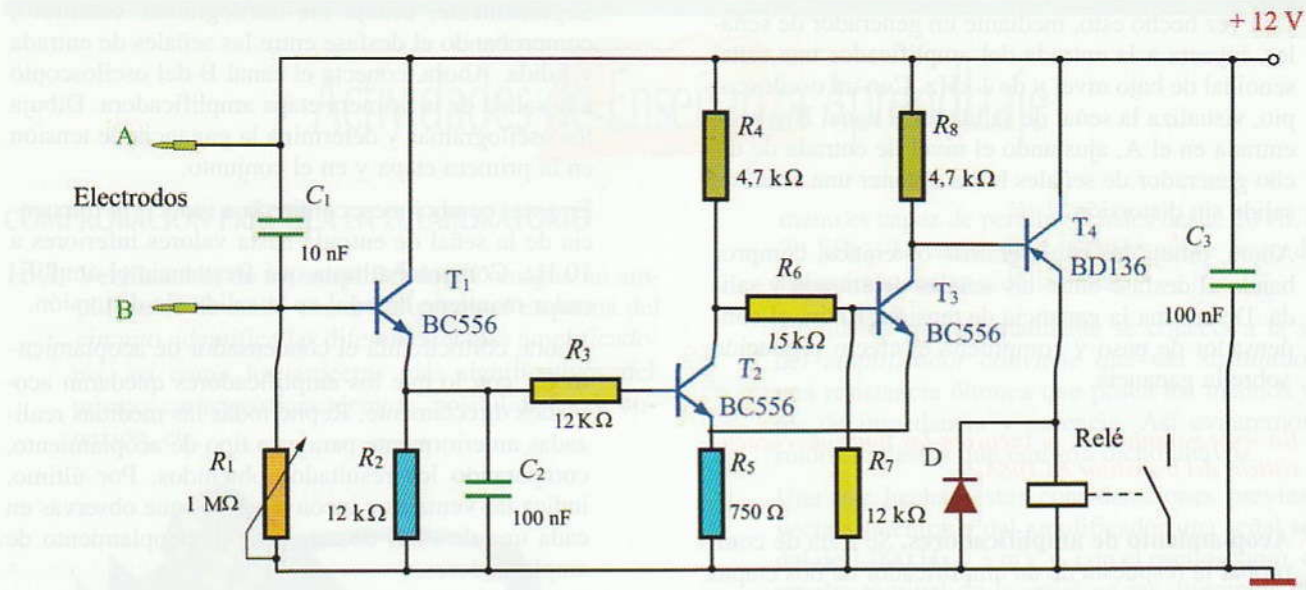


Figura 13.44. Circuito para riego automático.

conducir dicho transistor. En estas condiciones el transistor T_2, que posee su base conectada al emisor de T_1, tampoco conducirá, por lo que su colector tendrá un potencial positivo, suficiente para hacer conducir el transistor T_3. Ahora, el colector de T_3 se hace muy negativo y provoca que el transistor T_4 de tipo PNP entre en conducción y accione el relé. De esta forma se consigue que al secarse el terreno los contactos del relé pongan en funcionamiento las electroválvulas de la red de riego.

Cuando el terreno ha alcanzado un determinado grado de humedad, la resistencia entre los electrodos se hace pequeña y provoca la conducción de T_1 y T_2 y con ello la desactivación de T_3 y T_4, desconectándose finalmente el relé y el sistema de riego.

Mediante la resistencia variable R_1 es posible ajustar el punto óptimo de funcionamiento del circuito para un determinado grado de humedad.

Consigue los materiales necesarios para la realización práctica de este circuito y comprueba su funcionamiento.

¿Qué función posee el diodo D?

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del transistor BC556 y BD136.

13.5 Localización y reparación de averías en un amplificador. ¿Funciona correctamente el amplificador de audio comercial que has verificado en la anterior actividad? Dada la dificultad que entraña la reparación de estos equipos complejos, seguidamente mostramos, a modo de ejemplo, un ejercicio práctico consistente en determinar la etapa defectuosa de un sencillo amplificador de dos etapas.

El esquema eléctrico del amplificador a verificar es el que se muestra en la Figura 13.45.

Consigue un circuito de este tipo o, en su defecto, móntalo en la placa de conexiones del entrenador didáctico de electrónica y sigue los siguientes pasos:

a) Conecta a la entrada un generador de señales de B.F., con un nivel de señal medio (aquel que no llegue a saturar el amplificador) y una frecuencia de 1.000 Hz.

b) Mide con el osciloscopio la señal en la base, colector y emisor de los transistores T_1 y T_2.

El amplificador se encontrará sin averías si encontramos una señal de 1 kHz en:

- Base de T_1 a bajo nivel.
- Colector de T_1 con un nivel más alto que en su base, debido a la ganancia del transistor.
- Emisor de T_1 con un nivel inferior al 100% del colector.
- Base de T_2 con el mismo nivel que en el colector de T_1.
- Colector de T_2 con más nivel que en su base.
- Emisor de T_2 con un nivel inferior a su colector.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

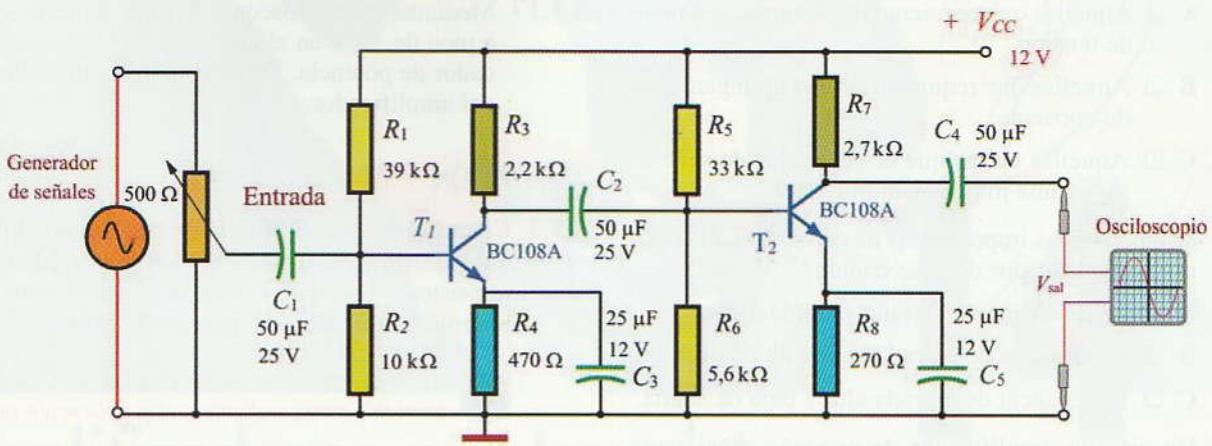


Figura 13.45.

En el caso de que el circuito estuviese averiado en algún punto, la señal se desvanecería en el mismo. Así, por ejemplo, si la señal llega a la base de T_2 pero no aparece en el colector del mismo, está claro que el componente averiado es el transistor T_2. En este caso habrá que comprobar su funcionamiento mediante el polímetro. En el caso de que estuviese en buen estado, habrá que comprobar los valores de las resistencias de polarización.

El proceso que se ha seguido para la localización de averías en este sencillo amplificador es igualmente válido para otros más complejos.

AUTOEVALUACIÓN

13.1 ¿Cuál de las configuraciones sería más adecuada para diseñar un amplificador que tuviese a su entrada un generador de señales de alta impedancia?

A ❑ Base común.

B ❑ Colector común.

C ❑ Emisor común.

13.2 ¿Por qué se caracteriza un amplificador de clase A?

A ❑ La señal de salida está distorsionada.

B ❑ Sólo aparece en la salida la parte positiva de la señal.

C ❑ Aporta a su salida una señal sin distorsión.

13.3 La señal de entrada de un amplificador es de 6 mV y 2 mA. Determina la ganancia de tensión, potencia y corriente de este amplificador, si la señal que se obtiene en la salida es de 2 V y 20 mA.

13.4 En un amplificador de audio, debido a un error se ha polarizado al transistor, correspondiente a una de las etapas del mismo, en un punto muy próximo a la zona de corte. ¿Cuál piensas que puede ser el efecto creado en la salida del altavoz cuando se aplique una señal de audio de nivel medio a la entrada del amplificador?

A ❑ Se produce un recorte y distorsión en la audición.

B ❑ No se produce ningún efecto apreciable.

C ❑ Aporta a su salida una señal sin distorsión.

13.5 Qué desfase se produce entre la señal de entrada y de salida en un amplificador de emisor común?

A ❑ Ninguno.

B ❑ 180°.

C ❑ 90°.

13.6 ¿Qué efecto se produce al eliminar el condensador de paso del emisor de un amplificador de emisor común?

A ❑ Aumenta la ganancia del amplificador.

B ❑ Sólo aparece en la salida la parte positiva de la señal.

C ❑ Se reduce la ganancia del amplificador.

13.7 ¿Qué efecto produce la conexión de un condensador de acoplamiento a la entrada de un amplificador?

A ❑ Elimina la componente continua de la señal a amplificar.

B ❑ Elimina la componente alterna de la señal a amplificar.

C ❑ Aumenta la ganancia del amplificador.

13.8 ¿Qué aplicaciones se pueden hacer del amplificador en colector común? ¿Cómo son su impedancia de entrada y su ganancia? ¿Y para el amplificador de base común?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

A ❑ Aquellas que requieran de una gran ganancia de tensión.

B ❑ Aquellas que requieran de una gran ganancia de corriente.

C ❑ Aquellas en las que el generador de señales posea una impedancia muy alta.

13.9 ¿Cómo son las impedancias de entrada y salida para un amplificador de base común?

A ❑ Impedancias de entrada y salida altas.

B ❑ Impedancia de entrada baja y alta de salida.

C ❑ Impedancia de entrada alta y baja de salida.

13.10 Un circuito amplificador de pequeña señal tiene conectado a su entrada un micrófono de 10 kΩ de resistencia interna. Averigua la capacidad recomendable para el condensador de acoplamiento con el amplificador si éste posee una resistencia de entrada de 11 kΩ y se desea que trabaje dentro de las frecuencias de 10 Hz y 30 kHz.

13.11 En un amplificador de potencia se sitúa el punto de trabajo del transistor en el centro de la recta de carga. ¿De qué clase es este amplificador?

A ❑ Clase A.

B ❑ Clase AB.

C ❑ Clase B.

13.12 ¿Qué amplificador consigue un mayor rendimiento?

A ❑ Clase A.

B ❑ Clase AB.

C ❑ Clase B.

13.13 ¿Cómo se consigue reducir la distorsión de cruce de un amplificador de potencia de clase B?

A ❑ Reduciendo la frecuencia de la señal de entrada.

B ❑ Haciéndolo trabajar en clase AB.

C ❑ Aumentando la frecuencia de la señal de entrada.

13.14 Un amplificador proporciona una potencia en su salida de 10 W. Para ello, la fuente de alimentación de 12 V proporciona una corriente de 4 A. ¿Cuál será el rendimiento del amplificador?

13.15 Un amplificador posee un rendimiento del 25%. Determina la corriente que debe proporcionar una fuente de alimentación de 10 V al circuito, si la potencia de salida es de 15 W.

13.16 ¿Cuál es la ganancia de potencia de un amplificador, si $A_v = 200$ y $A_i = 150$?

13.17 Mediante un osciloscopio se mide una tensión pico a pico de 30 V en el altavoz de 8 Ω de un amplificador de potencia. Determina la potencia de salida del amplificador.

AMPLIACIÓN

13.1 **Circuito de preamplificador para micrófono.** Se trata de un circuito electrónico que mediante dos transistores consigue elevar la pequeña señal de un micrófono con una ganancia de 32 db.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

13.2 **Circuito amplificador audio 10 W con circuito integrado TDA2003.** Se trata de conseguir, mediante sólo un circuito integrado como elemento activo, un amplificador de audio que sea capaz de proporcionar una potencia de 10 W sobre un altavoz con un rango de impedancia de 2 a 8 ohmios.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

13.3 **Amplificador audio estéreo de 2 × 10 W con circuito integrado TDA2009.** Se trata de conseguir, mediante sólo un circuito integrado como elemento activo, un amplificador de audio estéreo que sea capaz de proporcionar una potencia de 2 × 10 W en ambos canales.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

13.4 Habrás podido comprobar cómo con un solo circuito integrado es posible construir un amplificador de forma sencilla. Entra en Internet y busca en un datasheet, como por ejemplo:

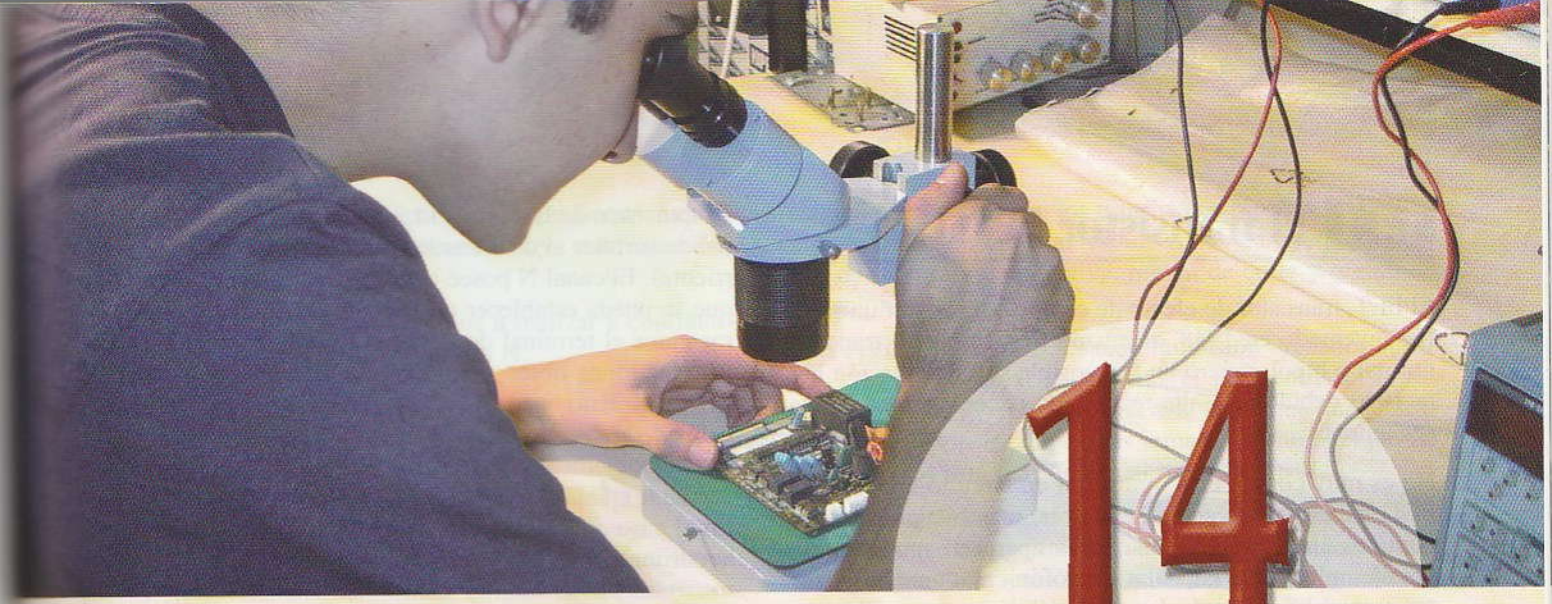
http://www.datasheetcatalog.com

circuitos integrados para aplicaciones en amplificadores de audio y realiza una clasificación de los mismos. A su vez, busca en Internet circuitos prácticos de amplificadores y analiza su composición y funcionamiento.

13.5 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Busca un fabricante de amplificadores y analiza las características de los diferentes tipos fabricados. Además, estudia el funcionamiento y composición de diferentes circuitos prácticos de amplificadores que puedas encontrar en Internet.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



14

Amplificadores con transistores de efecto de campo

En esta unidad didáctica vamos a estudiar los transistores unipolares de efecto de campo, que poseen unas características idóneas para el tratamiento de señales débiles. El tipo de transistores a los que nos referimos son los FET (transistores de unión de efecto de campo) *y los* MOSFET (transistores de efecto de campo de puerta aislada). *La diferencia fundamental entre los transistores bipolares y los unipolares es que los primeros funcionan aprovechando tanto los portadores mayoritarios como los minoritarios, mientras que los segundos funcionan sólo gracias a los portadores mayoritarios.*

En los amplificadores construidos con transistores unipolares de efecto de campo, la corriente que se obtiene a la salida es proporcional a la tensión que se aplica a la entrada, con lo que se obtiene una elevada ganancia y una resistencia de entrada prácticamente infinita. Esto les hace ideales para la amplificación de señales débiles.

Contenido

14.1. **El transistor FET**
14.2. **El transistor MOSFET**
14.3. **Amplificadores con transistores FET**
14.4. **Amplificadores con MOSFET**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los transistores de efecto de campo.
- Describir las curvas características más representativas de los transistores de efecto de campo, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- Describir los circuitos de polarización de los transistores de efecto de campo.
- Conocer las aplicaciones de cada una de las configuraciones de los amplificadores construidos con transistores de efecto de campo.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

14.1 El transistor FET

El FET, transistor de efecto de campo o transistor unipolar, fue inventado en 1948, al mismo tiempo que el transistor normal o bipolar, pero no fue posible su implantación hasta 1970 debido a la alta tecnología necesaria para formar sus uniones.

No es muy común encontrarse en un circuito un transistor FET aislado, éstos suelen aparecer, más bien, insertos en circuitos integrados. Otras veces aparecen incorporados, por ejemplo, en las cápsulas microfónicas, como un pequeño preamplificador de la señal débil que se produce en éstas.

Un FET reúne las características más interesantes de las válvulas electrónicas, con las grandes ventajas de los componentes semiconductores. Según su composición, existen dos tipos de transistores FET, los *FET* de canal *N* y los *FET* de *canal P*.

En la Figura 14.1 se muestra la estructura de un transistor unipolar FET de canal N con su símbolo correspondiente.

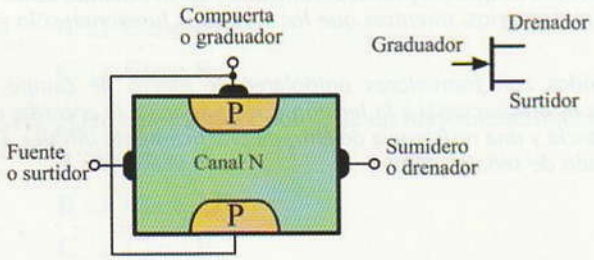


Figura 14.1. Transistor FET de canal N.

Este componente está formado por una delgada capa de material semiconductor tipo N denominado canal. A los lados de éste aparecen dos regiones de material semiconductor tipo P. En cada uno de los extremos del canal se sitúa un terminal. Así, tenemos un terminal de fuente o surtidor (del inglés *source*) y otro de sumidero o drenador (*drain*). Las dos regiones P se interconectan entre sí y, exteriormente en el terminal de compuerta o graduador (*gate*).

Este componente funciona de la siguiente forma: en los transistores de unión bipolares, la corriente colector emisor se controlaba gracias a la variación de la pequeña corriente que se aplica a la base, realizándose la conducción tanto por electrones como por huecos. Sin embargo, los transistores de efecto de campo funcionan solamente con un tipo de portadores de carga: huecos o electrones, según el tipo de canal. Así, por ejemplo, en un FET de canal N los portadores son los electrones.

El transistor de la Figura 14.2 conduce siempre del terminal de surtidor al de drenador (sentido electrónico de la corriente). El canal N posee suficientes electrones libres para que se pueda establecer un paso de corriente. Si ahora sometemos el terminal de graduador a una tensión negativa, los electrones libres serán expulsados por repulsión fuera del canal. Esto hace que el canal se quede con menos portadores de carga y, por lo tanto, su resistencia aumente considerablemente, lo que provoca una disminución de la corriente que atraviesa el canal del surtidor al de drenaje. En el caso de que la tensión sea suficientemente negativa, la corriente puede dejar de fluir.

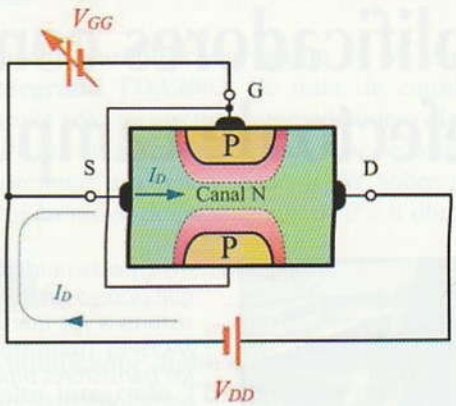


Figura 14.2. Funcionamiento de un FET de canal N.

A esta forma de trabajo se la denomina de *empobrecimiento*, es decir, que la tensión de control aplicada al graduador empobrece o extrae los portadores del canal, lo que hace que éste se estreche al paso de la corriente.

En el FET de canal P de la Figura 14.3 se utiliza material semiconductor P para el canal y N para la puerta.

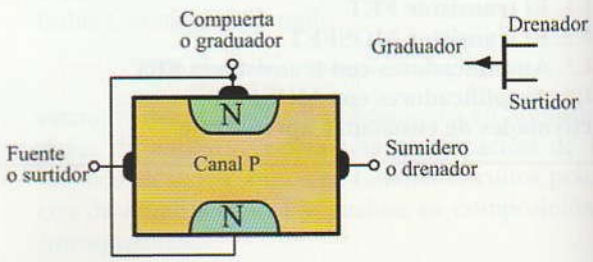


Figura 14.3. Transistor FET de canal P.

Observa que en este caso, la flecha del canal, en el símbolo, apunta hacia fuera. La tensión aplicada a la puerta se hace ahora positiva, con lo que se consigue así repeler los huecos existentes en el canal P y controlar de esta forma la corriente del surtidor. En cualquiera de los dos tipos de transistores unipolares, la tensión de polarización del diodo

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

formado por la puerta y el canal se polariza inversamente. De esta forma evita que por esta unión fluya corriente eléctrica.

Todo el estudio del FET que vamos a realizar a continuación lo haremos para el de canal tipo N.

14.1.1. Curvas características de drenador de un FET

En la Figura 14.4 se muestra un ejemplo de la familia de curvas características de surtidor común de un transistor FET de canal N, y en la Figura 14.5 el circuito correspondiente con el que se han obtenido dichas curvas.

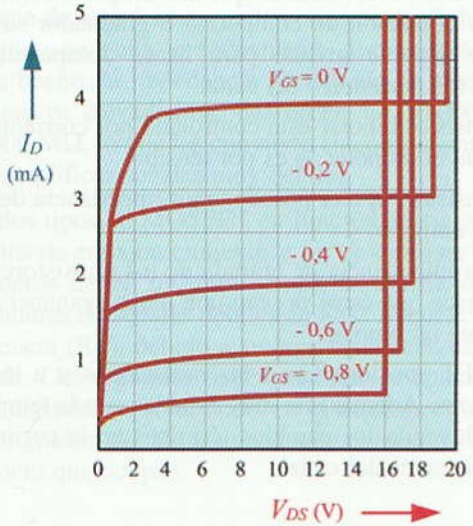


Figura 14.4. **Curvas de surtidor.**

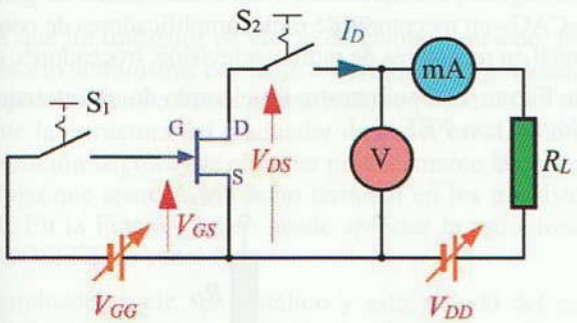


Figura 14.5. **FET en surtidor común de un FET.**

Examinando estas curvas podemos observar que la corriente de drenaje (I_D) se hace más pequeña a medida que aumenta la tensión negativa aplicada entre el graduador y el surtidor (V_{GS}).

Al igual que ocurría con los transistores bipolares, en estas curvas se pueden apreciar cuatro zonas de operación: región de ruptura, región activa, región de corte y región de saturación.

En la *región de ruptura*, cuando la tensión drenador-surtidor (V_{DS}) aumenta excesivamente, el FET entra en la región de ruptura y se produce una avalancha que puede destruir el transistor. En las curvas tomadas como ejemplo de la Figura 14.4 esta tensión es del orden de 16 V.

En la **región de corte**, el transistor entra en corte, es decir, no conduce (se comporta como un interruptor abierto). Esto ocurre cuando la tensión negativa del graduador o puerta es suficiente para estrangular totalmente el canal. Así, por ejemplo, en el transistor FET del circuito de la Figura 14.6 esta tensión V_{GS} es de $-1{,}2$ V. A esta tensión se la representa por $V_{GS\,(apag)}$.

En la **región de saturación**, el transistor se convierte en un buen conductor (se comporta como un interruptor cerrado). Esto ocurre cuando se cortocircuitan los terminales de compuerta y fuente y $V_{GS} = 0$. Para este valor (observa las curvas características de la Figura 14.4), la corriente se mantiene prácticamente constante (aproximadamente $I_D = 4$ mA) a partir del codo de la curva (aproximadamente $V_{DS} = 3$ V).

A esta corriente se la conoce por I_{DSS} y es la máxima que se puede dar en el drenador de un FET con la puerta en cortocircuito.

Según las curvas de la Figura 14.6: $I_{DSS} = 4$ mA; el FET se encuentra en saturación cuando V_{DS} se encuentra entre 0 y 3 V.

La **región activa** del FET se encuentra entre las regiones de saturación y ruptura. Según las curvas expuestas, esta región se encontrará para los valores de 3 a 16 V de V_{DS}.

14.1.2. Corriente de fuga de graduador o compuerta

La unión que se establece entre los cristales del graduador y el surtidor se comporta como si fuese un diodo de silicio polarizado inversamente, por lo que la corriente inversa que fluye por el graduador es muy pequeña, prácticamente despreciable. Ésta es la razón por la que sólo se tiene en cuenta una corriente, la I_D.

14.1.3. Impedancia de entrada

Debido a que la corriente que circula por el terminal graduador es prácticamente cero, la resistencia o impedancia de entrada se hace elevadísima, del orden de miles de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

kilohmios. Por esta razón, este transistor se emplea más en aquellos casos en que se requiera una mayor impedancia de entrada.

14.1.4. Curvas de transferencia o transconductancia

Estas curvas nos indican los valores que toma la intensidad de drenador (I_D) en función de las variaciones que experimenta la tensión de graduador-surtidor (V_{GS}) para valores de V_{DS} constantes.

En general, la curva de transconductancia de cualquier FET posee la forma de una parábola, tal como se muestra en la Figura 14.6. Esta gráfica se corresponde con las curvas de drenador del FET de la Figura 14.4.

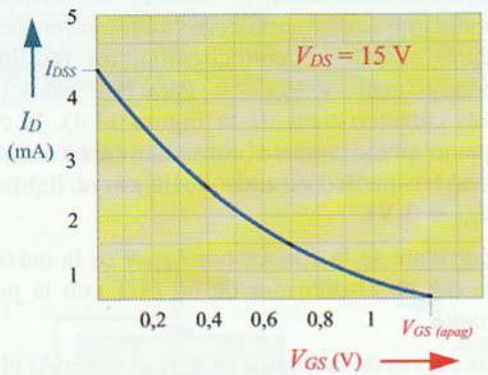


Figura 14.6. Curvas de transconductancia de un FET.

Esta curva se corresponde con la siguiente ecuación:

$$I_D = I_{DSS}\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS\,(apag)}}\right]^2$$

De esta forma, conociendo los valores de I_{DSS} y $V_{GS\,(apag)}$ (datos que suele proporcionar el fabricante en las hojas técnicas) se puede determinar el valor de la corriente I_D para cualquier valor de la tensión V_{GS} aplicada al graduador.

Actividad resuelta 14.1

Se sabe que en un FET, $I_{DSS} = 4$ mA y $V_{GS\,(apag)} = -1{,}2$ V. ¿Cuál será la corriente que fluye del surtidor a la fuente si la tensión $V_{GS} = -0{,}5$ V?

Solución: Aplicando la ecuación ya conocida

$$I_D = 0{,}004\left[1 - \frac{-0{,}5}{-1{,}2}\right]^2 = 0{,}0014 \text{ A} = 1{,}4 \text{ mA}$$

Actividad propuesta 14.1

¿Qué valor tomará I_D para los valores de 0,6 V y 0,8 V de V_{GS}?

14.1.5. Diferencias entre un transistor bipolar y uno unipolar

Entre estos transistores se pueden apreciar las siguientes diferencias:

- Un transistor bipolar no conduce hasta que se aplica corriente a la base, mientras que uno unipolar conduce hasta que la tensión de compuerta o graduador se hace lo suficientemente grande para hacer desaparecer totalmente los portadores del canal.
- El transistor bipolar está controlado por corriente, mientras que el unipolar lo es por tensión.
- El transistor bipolar posee menor impedancia de entrada que el unipolar.
- La alta impedancia de entrada de los transistores unipolares hace que éstos posean una menor ganancia de tensión que un bipolar.
- Los FET son inmunes a las radiaciones y a los ruidos eléctricos. Además son muy estables con la temperatura, no influyendo los cambios térmicos en la corriente que fluye a través del canal.

14.1.6. Aplicaciones del FET

El FET posee bastantes aplicaciones, como son: interruptores analógicos, multiplexores, control automático de ganancia «CAG» en receptores de radio, amplificadores de pequeña señal en receptores de radio y televisión, troceadores, etc.

En la Figura 14.7 se muestra un ejemplo de un *interruptor analógico con FET*.

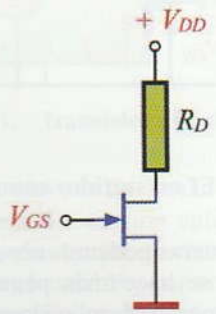


Figura 14.7. Interruptor analógico con FET.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Si a este circuito se le aplica una tensión $V_{GS} = 0$, el transistor entrará en saturación y se comportará como un interruptor cerrado. Por otro lado, si la tensión aplicada es $V_{GS} = V_{GS\,(apag)}$, el transistor se pondrá en corte y actuará como un interruptor abierto.

Cuando se utiliza un FET como interruptor, se le hace trabajar únicamente en dos estados, corte y saturación.

14.2 El transistor MOSFET

Los MOSFET *(Metal-Oxide Semiconductor, Field Effect Transistor)*, o simplemente MOS, son muy parecidos a los FET. La diferencia entre éstos estriba en que en los MOS, el graduador o la puerta está aislado del canal, con lo que se consigue de esta forma que la corriente de dicho terminal sea muy pequeña, prácticamente despreciable. Debido a este hecho, la impedancia de entrada de este tipo de transistores es elevadísima, del orden de 10.000 MΩ a 10.000.000 MΩ, lo que les convierte en componentes ideales para amplificar señales muy débiles.

Existen dos tipos de MOSFET en función de su estructura interna: los de empobrecimiento y los de enriquecimiento. Los primeros tienen un gran campo de aplicación como amplificadores de señales débiles en altas frecuencias o radiofrecuencia (RF), debido a su baja reactancia capacitiva de entrada. Los segundos tienen una mayor aplicación en circuitos digitales y, sobre todo, en la construcción de circuitos integrados, debido a su pequeño consumo y al reducido espacio que ocupan.

14.2.1. MOSFET de tipo de empobrecimiento

Para que un transistor de efecto de campo funcione, no es necesario suministrar corriente al terminal del graduador o compuerta. Teniendo en cuenta esto, se puede aislar totalmente la estructura del graduador de la del canal. Con esta disposición se consigue eliminar prácticamente la corriente de fuga que aparecía en dicho terminal en los transistores FET. En la Figura 14.8 se puede apreciar la estructura de un MOSFET de canal N.

El graduador suele ser metálico y está aislado del canal mediante una fina capa de óxido de silicio.

Este componente puede funcionar tanto en la forma de empobrecimiento [Figura 14.9(a)], como de enriquecimiento [Figura 14.9(b)].

La forma de trabajo de empobrecimiento se explica como sigue [véase la Figura 14.9(a)]: los electrones de la fuente

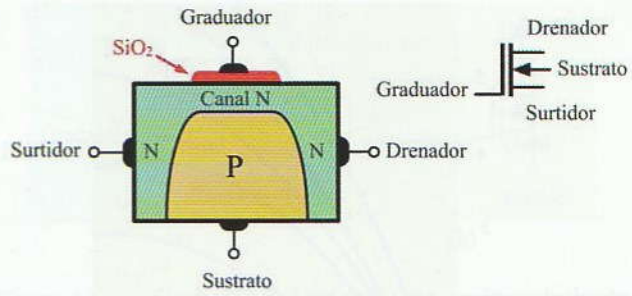
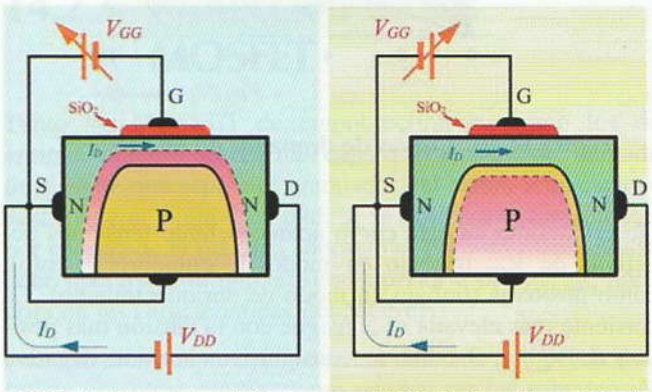


Figura 14.8. MOSFET del tipo de empobrecimiento.



(a) Modo de empobrecimiento (b) Modo de enriquecimiento

Figura 14.9. Funcionamiento de un MOSFET.

pueden circular desde el surtidor hacia el drenador a través del canal estrecho del material semiconductor tipo N. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial V_{DD}, aplicada por la fuente, mayor será esta corriente. Como ocurría con el FET, la tensión negativa, aplicada al graduador, produce un estrechamiento en el canal debido al empobrecimiento de portadores, lo que hace que se reduzca la corriente de drenador. Aquí se aprecia claramente que el fenómeno de control se realiza a través del efecto del campo eléctrico generado por la tensión V_{GG} del graduador.

Debido a que el graduador está aislado del canal, se le puede aplicar una tensión positiva de polarización [véase la Figura 14.9(b)]. De esta manera se consigue hacer trabajar al MOSFET en enriquecimiento. Efectivamente, la tensión positiva del graduador provoca un aumento o *enriquecimiento* de electrones libres o portadores del canal, de tal forma que, al aumentar la tensión positiva V_{GG}, aumenta también la corriente de drenador.

Curvas características

En la Figura 14.10, se muestra la familia de curvas de drenador de un MOSFET de empobrecimiento de canal N.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

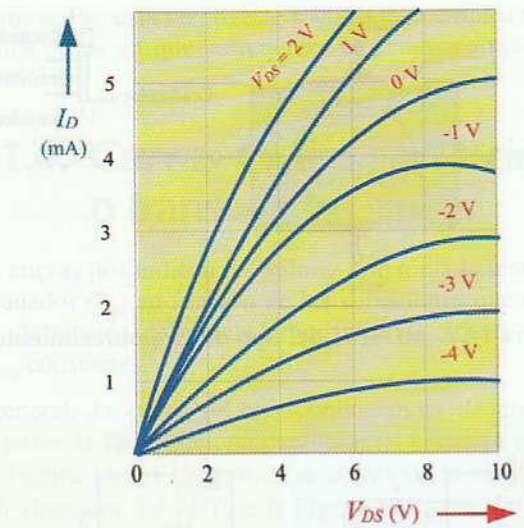


Figura 14.10. Curvas de drenador de un MOSFET.

Observa cómo en esta curva aparecen tanto tensiones negativas de V_{GS} (trabajo en modo de empobrecimiento), como positivas (trabajo en modo de enriquecimiento). La corriente más elevada se consigue con la tensión más positiva de V_{GS} y el corte se consigue con tensión negativa $V_{GS\,(apag)}$.

De esta familia de curvas se puede obtener la curva de transconductancia, que nos indica la relación que existe entre V_{GS} e I_D. Tiene la forma que se muestra en la Figura 14.11.

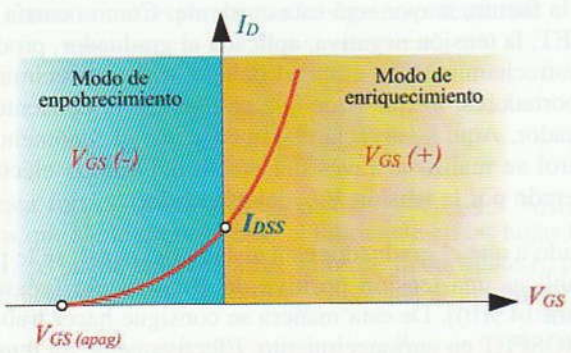


Figura 14.11. Curva de transconductancia de un MOSFET.

Observa cómo esta curva aparece dibujada en los dos cuadrantes del eje de tensiones. Esto es debido a que el MOSFET puede operar tanto con tensiones positivas como negativas. Por esta razón, la corriente I_{DSS}, correspondiente a la intersección de la curva con el eje de I_D, ya no es la de saturación.

Como ocurría con el FET, esta curva de transconductancia es parabólica y la ecuación que la define es también:

$$I_D = I_{DSS}\left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS\,(apag)}}\right]^2$$

Según se puede apreciar en la curva de transconductancia de un MOSFET, este tipo de transistor es muy fácil de polarizar, ya que se puede escoger el punto correspondiente a $V_{GS} = 0$, $I_D = I_{DSS}$. Cuando éste queda polarizado así, el transistor queda siempre en conducción o, normalmente, encendido.

Símbolos de los MOSFET

En la Figura 14.12(a), podemos ver un transistor MOSFET de canal N (punta hacia adentro) con cuatro terminales disponibles. El terminal de sustrato está libre, en algunos casos, para dar al transistor un mayor control sobre la corriente de drenador.

Normalmente el terminal del sustrato se conecta internamente con el surtidor, con lo que queda así un componente de tres terminales, tal como se muestra en las Figuras 14.12(b) (transistor MOSFET de empobrecimiento de canal N con tres terminales) y 14.12(c) (transistor MOSFET de canal P).

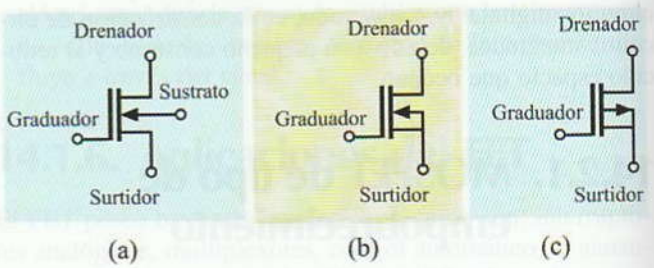


Figura 14.12. Símbolos del MOSFET de empobrecimiento. (a) de canal N con cuatro terminales. (b) de canal N con tres terminales. (c) de canal P.

14.2.2. MOSFET de enriquecimiento

Este tipo de MOSFET está diseñado de tal forma que sólo admite la forma de trabajo en modo de enriquecimiento. La aplicación fundamental de este transistor se realiza en circuitos digitales, microprocesadores, etc.

En la Figura 14.13, se muestran las curvas de drenador y en la 14.14 las de transconductancia de este tipo de MOSFET.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

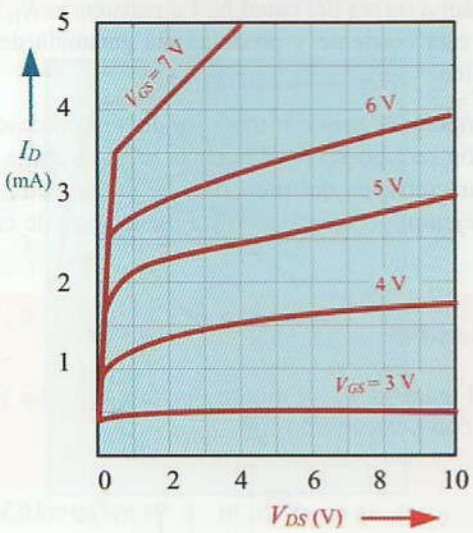


Figura 14.13. Curvas de drenador de un MOSFET.

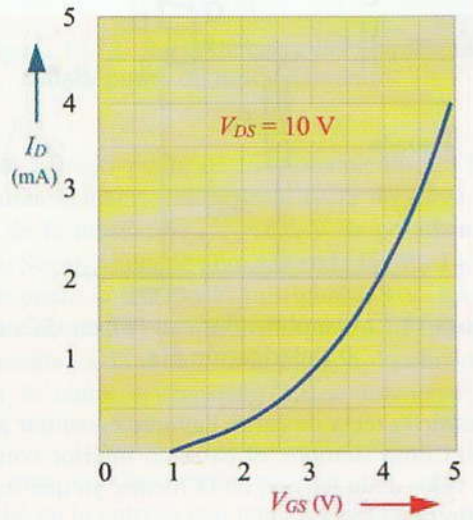


Figura 14.14. Curvas de transconductancia de un MOSFET.

Como se podrá observar en las curvas características, este transistor sólo conduce cuando son aplicadas tensiones positivas al drenador, por lo que normalmente estará en no-conducción o apagado.

Los símbolos que representan al MOSFET de enriquecimiento son los que se indican en las Figuras 14.15(a) (MOSFET de enriquecimiento canal N) y 14.15(b) (MOSFET de enriquecimiento canal P).

Observa cómo la línea del canal en estos transistores se representa como una línea punteada.

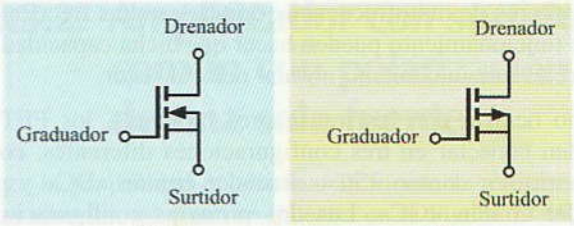


Figura 14.15. Símbolos del MOSFET de enriquecimiento. (a) Canal N. (b) Canal P.

14.2.3. Protección de los MOSFET

Tanto los MOSFET de empobrecimiento como los de enriquecimiento poseen una capa extremadamente delgada de aislante que separa el graduador del canal. Esta capa se destruye con suma facilidad, si se aplica una tensión V_{GS} por encima de la máxima soportable. Por esta razón, nunca debe operarse con una tensión superior a la $V_{GS(máx)}$ prescrita en las características del MOSFET.

Aún así, dicha capa aislante es tan delicada que puede destruirse por otras causas, como pueden ser las sobretensiones provocadas, al insertar o retirar un MOSFET del circuito sin haber desconectado la fuente de alimentación. También puede ocurrir, en ciertos casos, que al tocar con las manos los terminales de un MOSFET se produzca una descarga electrostática entre los mismos que los destruyan.

14.3 Amplificadores con transistores FET

Los transistores FET ofrecen algunas ventajas que los hacen más adecuados en ciertas aplicaciones. Seguidamente, se exponen algunos de estos casos:

- La alta impedancia de entrada los hace ideales para aplicaciones en voltímetros electrónicos, osciloscopios y otros instrumentos que requieran una alta impedancia de entrada para evitar cargar el circuito al que se le aplica la medida.
- Poseen una salida de ruido bastante baja, lo que hace que sean muy útiles en circuitos amplificadores previos de pequeña señal.
- Poseen una capacidad entre sus electrodos bastante reducida. Por esta razón, el FET es muy adecuado en ampli-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

ficadores de radiofrecuencia, donde las altas frecuencias de funcionamiento pueden hacer que dicha capacidad altere el funcionamiento normal del transistor.

Como ocurría con los transistores bipolares, los FET se pueden conectar en tres configuraciones diferentes, como son: surtidor común «SC», drenador común «DC» y graduador común «GC». Las dos primeras configuraciones poseen una alta impedancia de entrada, lo que los hace muy recomendables para amplificadores de señales débiles. Sin embargo, el último amplificador (GC) posee muy pocas aplicaciones.

Seguidamente, vamos a estudiar el amplificador de surtidor común, por ser el de más uso.

14.3.1. Amplificador de surtidor común «SC»

En la Figura 14.16, se muestra un amplificador con FET en configuración «SC».

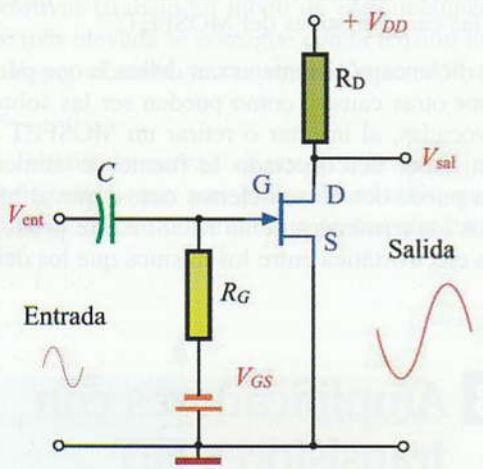


Figura 14.16. Amplificador con FET en configuración surtidor común.

Este circuito es muy similar al del amplificador de emisor común con transistores bipolares. La tensión V_{GS} polariza inversamente la unión graduador-surtidor a través de la resistencia R_G. Ésta debe poseer un valor muy elevado (del orden de 1 MΩ), ya que de ello depende el valor de la impedancia de entrada. Por otro lado, como apenas circula corriente por esta resistencia, la caída de tensión que se producirá en ella se hace prácticamente despreciable y no afectará a la polarización del graduador.

La tensión de alimentación V_{DD} es positiva respecto a masa, por lo que la corriente del surtidor circulará hacia el drenador a través del canal N. La resistencia R_D limita el paso de esta corriente y produce una ganancia de tensión en la salida.

Para comprender mejor cómo se realiza el proceso de amplificación será necesario dibujar la recta de carga sobre la curva característica del drenador. Seguidamente, exponemos un ejemplo de cómo se traza dicha recta de carga.

Actividad resuelta 14.2

En la Figura 14.17, se muestra un amplificador FET en «SC» con polarización fija.

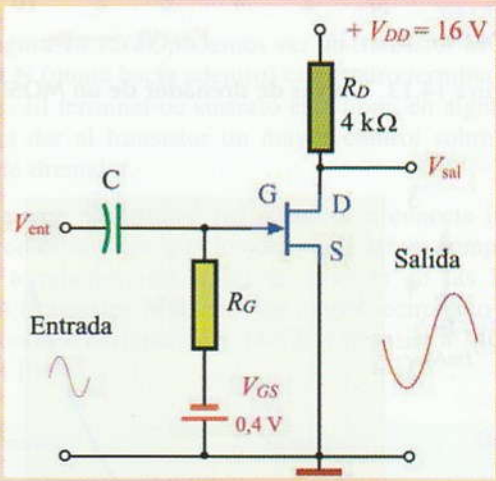


Figura 14.17. Amplificador con FET en «SC» con polarización fija.

Para trazar la recta de carga hay que encontrar sus extremos. Como siempre, el extremo inferior coincidirá con el valor de la tensión de la fuente, ya que según la ecuación de la recta:

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D}$$

para $I_D = 0$ se cumple que $V_{DS} = V_{DD} = 16$ V.

El extremo superior de la línea de carga se encontrará para $V_{DS} = 0$, es decir:

$$I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} = \frac{16}{4.000} = 0{,}004 \text{ A} = 4 \text{ mA}$$

Si llevamos ahora estos valores a las curvas características de drenador, podremos trazar la recta de carga, tal como se muestra en la Figura 14.18.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

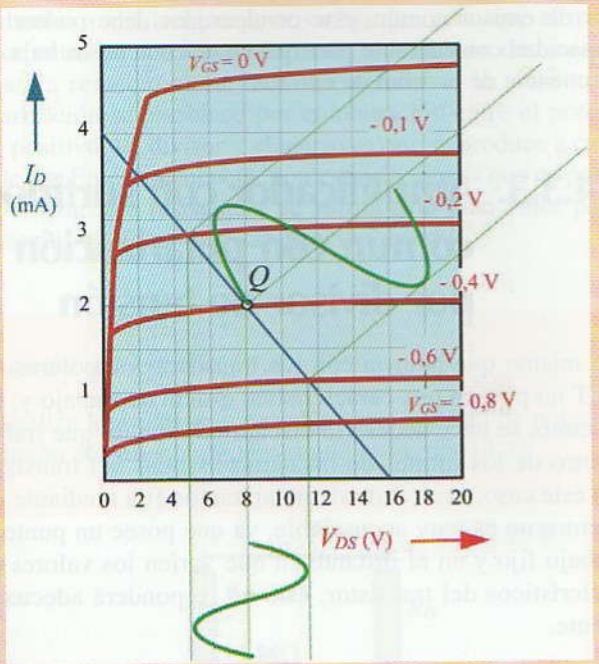


Figura 14.18. Recta de carga del amplificador y punto de funcionamiento.

En este caso, el punto de funcionamiento del FET lo determina la intersección de la recta de carga con la curva de la tensión $V_{GS} = -0{,}4$ V de polarización de puerta. Según se puede apreciar en la Figura 14.18, para este punto la tensión V_{DS} es igual a 8 V. Lo que es bastante aceptable, ya que se encuentra situado aproximadamente en la mitad de la tensión de alimentación y, por lo tanto, el transistor puede funcionar linealmente.

Si en estas condiciones inyectamos una señal alterna senoidal en la entrada con una variación entre picos de 0,4 V, la tensión V_{GS} de polarización variará a lo largo de la línea de carga entre los valores de $-0{,}2$ V y $-0{,}6$ V (véase la Figura 14.19). Esto ocasiona que la tensión V_{DS}, que aparece en la salida, varíe entre 4,8 y 11,5 V. Es decir, 6,7 V entre picos.

La ganancia de tensión en este caso será:

$$A_V = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{6{,}7 \text{ V}}{0{,}4 \text{ V}} = 16{,}75$$

Si observas atentamente la señal de entrada y la comparas con la de salida, apreciarás que ésta última aparece con una inversión de fase de 180, igual que ocurre en un amplificador de emisor común.

14.3.2. Amplificador con surtidor común con polarización de una sola fuente

Existe la posibilidad de eliminar la fuente de polarización del graduador, tal como se muestra en la Figura 14.19.

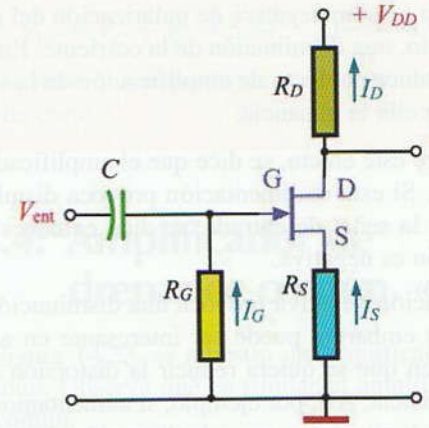


Figura 14.19. Amplificador FET en «SC» con polarización de una sola fuente.

A cambio de la fuente eliminada se conecta una resistencia R_S en serie con el surtidor. Al circular la corriente de surtidor por R_S, provoca una caída de tensión que hace que este terminal se haga positivo respecto al graduador. De esta forma, se consigue que dicho graduador quede sometido a una tensión de polarización negativa respecto al surtidor.

El cálculo de esta resistencia es muy sencillo, lo único que necesitamos conocer es la tensión de polarización y la corriente del surtidor en el punto de trabajo del transistor. Como $I_S = I_D$ e $I_G \simeq 0$, aplicando las leyes de Kirchhoff a la malla formada por R_S, graduador-surtidor y R_G, tendremos que:

$$R_S = \frac{V_{GS}}{I_D}$$

Actividad resuelta 14.3

Se desea sustituir la fuente de polarización de la Actividad resuelta 14.2 por una resistencia R_S. Determina su valor óhmico.

Solución: Recordemos que las coordenadas del punto de trabajo en aquel caso eran $V_{GS} = -0{,}4$ V y $I_D = 2$ mA. Por lo tanto, el valor de la resistencia R_S será:

$$R_S = \frac{0{,}4}{2 \cdot 10^{-3}} = 200\ \Omega$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Esta forma de polarización es más económica que la de dos fuentes, pero aparece un pequeño inconveniente. La ganancia de tensión se modifica sensiblemente con los cambios de corriente del surtidor. Veamos cómo ocurre esto:

Cuando se aplica una señal positiva a la entrada del graduador, la corriente del surtidor aumenta y con ella también lo hace la caída de tensión de R_S, lo que provoca un aumento de la tensión negativa de polarización del graduador y, por tanto, una disminución de la corriente. En consecuencia, se reduce el efecto de amplificación de la señal de entrada y con ella la ganancia.

Cuando ocurre este efecto, se dice que el amplificador está realimentado. Si esta realimentación provoca disminución del efecto de la señal de entrada, se dice entonces que la realimentación es negativa.

La realimentación negativa provoca una disminución de la ganancia. Sin embargo, puede ser interesante en aquellas aplicaciones en que se quiera reducir la distorsión a costa de perder ganancia. Así, por ejemplo, si aumentamos la corriente a unos límites cercanos a la distorsión, la realimentación negativa la reduciría y la mantendría siempre en la zona de operación sin distorsión.

Existen otras aplicaciones en las que interesa obtener una ganancia máxima de tensión. Para conseguirlo, es necesario eliminar la realimentación negativa mediante la conexión de un condensador de desacoplo o de paso en derivación con R_S, tal como se muestra en la Figura 14.20 (al igual que se hacía en los amplificadores de emisor común).

Este condensador cortocircuita a masa la señal de C.A. y elimina el efecto de realimentación. Sin embargo, la polarización se mantiene fijada por R_S, ya que en este caso es la componente de C.C. la que actúa (la C.C. queda bloqueada por el condensador). Al igual que se hacía en el amplificador de emisor común, este condensador debe poseer una capacidad considerable para que su reactancia sea baja a la frecuencia de la señal de entrada.

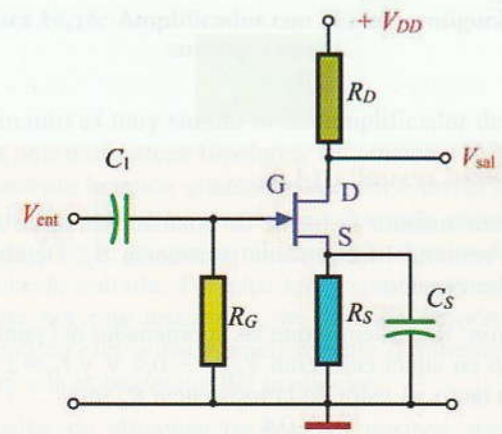


Figura 14.20. Condensador de paso en un amplificador en «SC».

14.3.3. Amplificador con surtidor común con polarización por divisor de tensión

Lo mismo que ocurría con los transistores bipolares, los FET no poseen una característica exacta de trabajo y, por lo tanto, se hace necesario diseñar un circuito que trabaje dentro de los límites de las características del transistor. En este caso, el circuito de polarización fija mediante dos fuentes no es muy aconsejable, ya que posee un punto de trabajo fijo y en el instante en que varíen los valores característicos del transistor, éste no responderá adecuadamente.

Por otro lado, el circuito de polarización por fuente es más interesante, ya que, debido al efecto de R_S, existe una estabilización del punto de trabajo en un determinado margen de actuación. Así, por ejemplo, si el transistor condujese más corriente de la esperada, aumentaría la tensión negativa de polarización y dicha corriente tendería a reducirse. No obstante, para que este efecto sea óptimo, se hace necesario que la resistencia del surtidor sea lo más alta posible, para que, así, se haga más notable el efecto de estabilización. El problema que se plantea con una R_S demasiado alta es que la tensión de polarización V_{GS} se puede hacer tan elevada que ponga en corte al transistor. Este fenómeno se puede evitar con un circuito de polarización por divisor de tensión, tal como se muestra en la Figura 14.21.

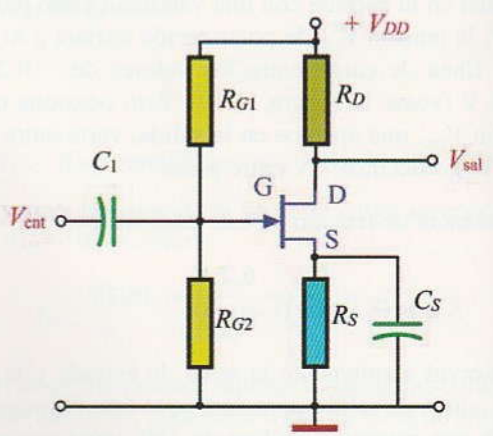


Figura 14.21. Amplificador FET en «SC» con polarización por divisor de tensión.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Con el circuito de la Figura 14.21, se somete al terminal de graduador a una tensión positiva fija que evita que el transistor entre en corte por efecto de una tensión demasiado negativa respecto al surtidor. En definitiva, la tensión de polarización se establece por combinación entre el potencial positivo del divisor y el negativo que se produce a causa de R_S. En consecuencia, con este circuito sí que es posible utilizar una resistencia de surtidor de gran valor para conseguir el efecto de estabilización deseado.

Actividad resuelta 14.4

Analiza los valores que se dan en el circuito de polarización por divisor de tensión de la Figura 14.22.

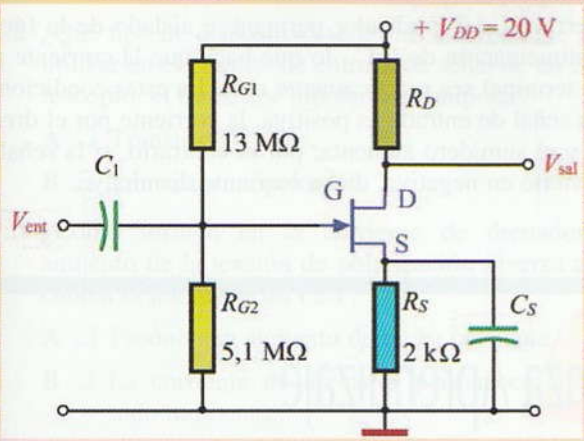


Figura 14.22.

Supongamos que el punto de funcionamiento de este circuito se encuentra para una corriente de 3,8 mA. Veamos cuál es la tensión de polarización en este caso. La tensión que aparece en el surtidor es:

$$V_S = R_S \cdot I_S = 2\ \text{k}\Omega \cdot 3{,}8\ \text{mA} = 7{,}6\ \text{V}$$

En el caso de que no existiese divisor de tensión, todo este potencial se convertiría en negativo respecto al graduador y pondría en corte a cualquier FET. Sin embargo, al existir dicho divisor de tensión, aparece una tensión positiva en el graduador igual a:

$$V_G = R_{G2} \cdot I \ (I = \text{corriente del divisor})$$

Como

$$I = \frac{V_{DD}}{R_{G1} + R_{G2}}$$

la ecuación resultante es:

$$V_G = R_{G2} \cdot \frac{V_{DD}}{R_{G1} + R_{G2}} =$$

$$= 5{,}1 \cdot 10^6 \cdot \frac{20\ \text{V}}{13 \cdot 10^6 + 5{,}1 \cdot 10^6} = 5{,}64\ \text{V}$$

La tensión V_{GS} de polarización será entonces:

$$V_{GS} = V_G - V_S = 5{,}64 - 7{,}6 = -1{,}96\ \text{V}$$

Lo que hace que el punto de trabajo no entre en la región de corte.

14.3.4. Amplificador de drenador común, «DC»

En la Figura 14.23, se muestra un amplificador de drenador común. Observa que es similar al amplificador de colector común.

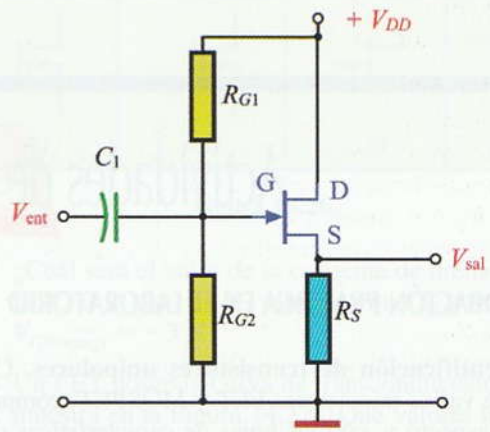


Figura 14.23. **Amplificador FET de drenador común «DC».**

Este amplificador funciona de forma muy similar a la del colector común. La tensión que aparece en la salida es una reproducción exacta de la de entrada, por lo que la ganancia es prácticamente igual a la unidad. Además, no existe inversión de fase.

Este circuito posee la ventaja de presentar una impedancia alta a su entrada y una impedancia baja a la salida, lo que le convierte en un circuito ideal en aplicaciones como entradas de instrumentos de medida electrónicos.

En definitiva, este amplificador cumple la función de aislamiento entre dos etapas. También se lo conoce por el nombre inglés de *buffer*.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

14.4 Amplificadores con MOSFET

Dado que en los transistores MOSFET el terminal de graduador está aislado del canal y que su corriente es prácticamente nula, estos semiconductores son ideales en aquellas aplicaciones donde se necesite un consumo de potencia reducido. Si a estas características les añadimos el pequeño espacio que puede llegar a ocupar en la elaboración de un circuito integrado, podremos encontrar con frecuencia C.I. construidos con transistores MOSFET, donde se utiliza la integración a gran escala (un solo chip puede llegar a contener miles de transistores). Aplicaciones típicas de estos componentes son: elaboración de microprocesadores y memorias que posteriormente se utilizan para la fabricación de ordenadores, calculadoras, sistemas de automatización complejos, etc.

En la Figura 14.24, se muestra un amplificador con MOSFET de empobrecimiento en surtidor común.

Con el circuito de la Figura 14.24, se consigue un funcionamiento lineal, ya que la polarización es nula. En este caso el terminal del graduador permanece aislado de la fuente de alimentación de C.C., lo que hace que la corriente por este terminal sea prácticamente nula. En estas condiciones, si la señal de entrada es positiva, la corriente por el drenador y el sumidero aumenta; por el contrario, si la señal se convierte en negativa, dicha corriente disminuye.

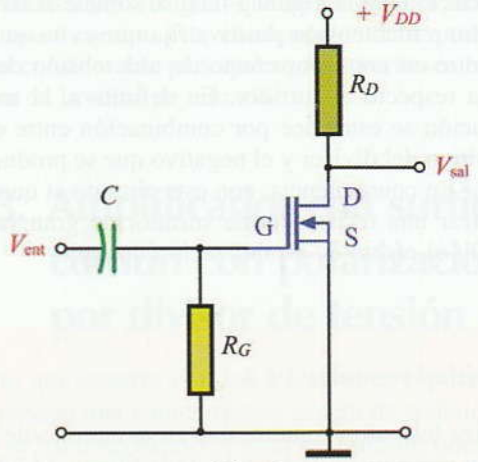


Figura 14.24. **Amplificador con MOSFET.**

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

14.1 Identificación de transistores unipolares. Consigue varios transistores FET y MOSFET, comprueba su aspecto y, con las hojas de características de los fabricantes de éstos, identifica sus valores característicos más significativos.

14.2 Verificación de un amplificador con FET. Vamos a comprobar la respuesta de un amplificador en configuración surtidor común. Para ello, consigue un circuito de este tipo, o en su defecto, monta el que se propone en la Figura 14.25.

Al igual que se hizo en las actividades de la Unidad didáctica 10, inyecta una señal senoidal a la entrada de 1 kHz y de un nivel tal que no se produzca distorsión en la salida. Con un osciloscopio visualiza los oscilogramas de entrada y salida, determinando la ganancia del amplificador, así como la relación de fase entre las señales de entrada y salida. Con él, mide también los potenciales V_G, V_D y V_S.

Para comprobar la cualidad que poseen estos amplificadores para trabajar con altas frecuencias, eleva la frecuencia de la señal de entrada y comprueba la respuesta del amplificador. *¿Cuál es el límite sin distorsión?*

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del transistor 2N5484.

AUTOEVALUACIÓN

14.1 ¿Cuál es la ventaja principal que poseen los transistores unipolares frente a los bipolares?

A ❑ La impedancia de entrada es muy elevada.

B ❑ Son más robustos y fáciles de manipular.

C ❑ Su conducción depende únicamente del efecto de la corriente de base.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

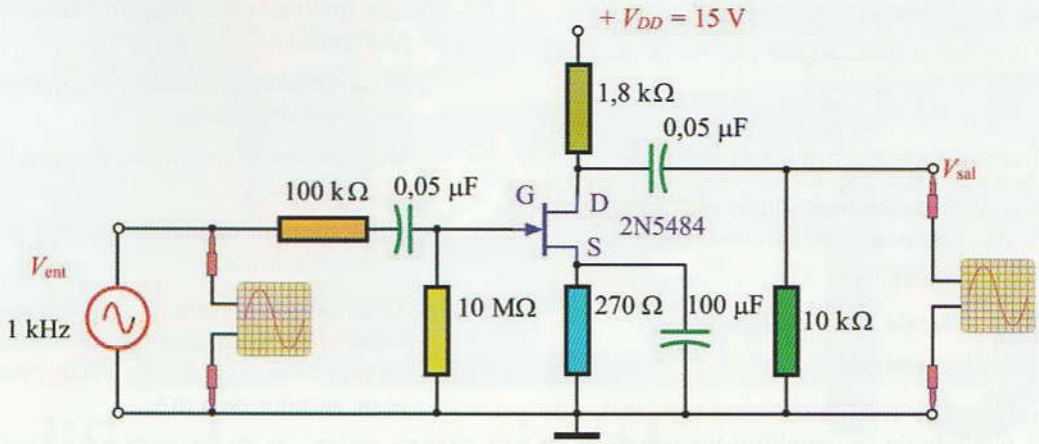


Figura 14.25.

14.2 ¿Qué tipo de dispositivo será más conveniente para utilizar en el circuito de entrada de señal de un osciloscopio, el transistor bipolar o el unipolar?

A ❑ Transistor bipolar.

B ❑ Transistor unipolar.

14.3 ¿Cómo influye en la corriente de drenador el aumento de la tensión de polarización inversa aplicado a la puerta de un FET?

A ❑ Produce un aumento de dicha corriente.

B ❑ La corriente de drenador permanece fija en todo momento.

C ❑ Produce una disminución de dicha corriente.

14.4 ¿Qué diferencia fundamental existe entre un FET y un MOSFET del tipo de empobrecimiento?

A ❑ La impedancia de entrada del MOSFET es mucho más elevada que en el FET.

B ❑ La impedancia de entrada del FET es mucho más elevada que en el MOSFET.

C ❑ La corriente por el graduador del MOSFET es mucho más pequeña que en el FET.

14.5 ¿Puede trabajar un MOSFET del tipo de enriquecimiento de canal N con una tensión de polarización V_{GS} negativa?

A ❑ No.

B ❑ Sí.

C ❑ Es indiferente.

14.6 En la Figura 14.26, se muestran una serie de símbolos. Indica al lado de cada uno de ellos de qué componentes se trata y el nombre de cada uno de sus terminales.

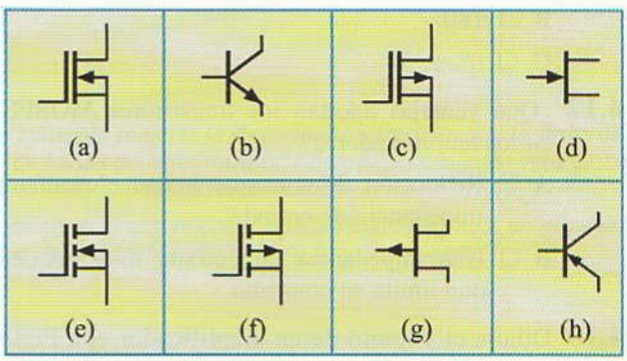


Figura 14.26.

14.7 ¿Cuál será el valor de la corriente de drenador de un FET, si $V_{GS} = -1$ V, sabiendo que $I_{DSS} = 12$ mA y $V_{GS\,(apag)} = -3$ V?

14.8 Un FET posee la curva de transconductancia que se muestra en la Figura 14.27. ¿Qué valores les corresponde a I_{DSS} y $V_{GS\,(apag)}$?

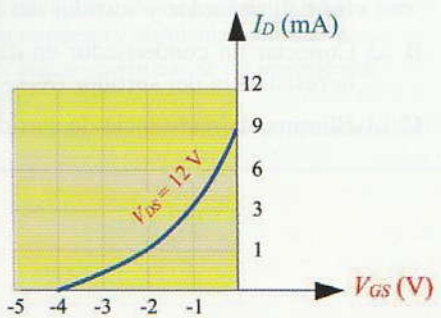


Figura 14.27.

14.9 ¿Qué aplicaciones se pueden hacer de los amplificadores con transistores unipolares de efecto de campo?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

A ❑ Etapas de amplificación de potencia.

B ❑ Circuitos amplificadores previos de pequeña señal.

C ❑ Circuitos de entrada de osciloscopios e instrumentación electrónica de precisión.

14.10 ¿Cómo es la impedancia de entrada de los amplificadores con transistores de efecto de campo?

A ❑ Muy elevada.

B ❑ Muy reducida.

C ❑ De valor intermedio.

14.11 ¿Qué relación de fase existe entre las señales de entrada y salida de un amplificador con FET en surtidor común?

A ❑ 90°.

B ❑ 180°.

C ❑ 0°.

14.12 ¿Qué ventajas aportan los transistores MOSFET en los amplificadores?

A ❑ Reducción de consumo y una elevadísima impedancia de entrada.

B ❑ Una impedancia de entrada muy pequeña que limita su consumo.

14.13 Dibuja el circuito de un amplificador con FET y con polarización de una sola fuente. Posteriormente, determina el valor de la resistencia de polarización (R_S), si el punto de trabajo de éste se encuentra para los valores: $V_{GS} = -3$ V y $I_D = 2$ mA.

14.14 ¿Qué método es conveniente utilizar en el amplificador del ejercicio anterior para limitar el efecto de la realimentación negativa sobre la ganancia?

A ❑ Conectar un condensador entre los terminales de graduador y surtidor del FET.

B ❑ Conectar un condensador en derivación con la resistencia del surtidor (R_S).

C ❑ Eliminar la resistencia de surtidor (R_S).

14.15 ¿De qué tipo es el amplificador que se muestra en la Figura 14.28?

A ❑ Graduador común con polarización por divisor de tensión.

B ❑ Surtidor común con polarización de una sola fuente.

C ❑ Surtidor común con polarización por divisor de tensión.

14.16 Determina la tensión de surtidor, de graduador y la tensión de polarización graduador-surtidor para el amplificador de la Figura 14.28 y para una corriente de surtidor de 5 mA.

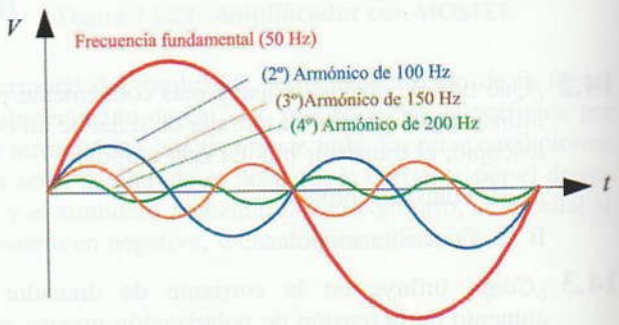


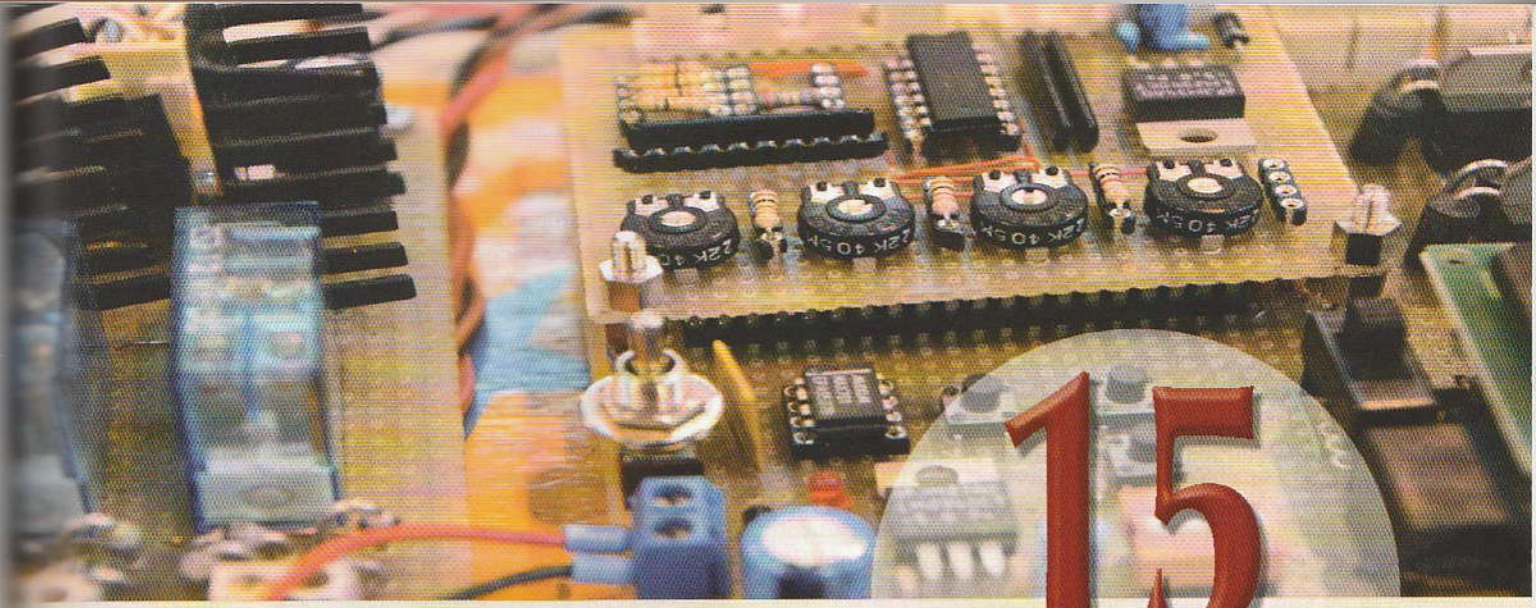
Figura 14.28.

AMPLIACIÓN

14.1 Como en otras ocasiones, consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, estudia el funcionamiento y la composición de diferentes circuitos prácticos de amplificadores de pequeña señal con amplificadores de efecto de campo, que puedas encontrar en Internet.

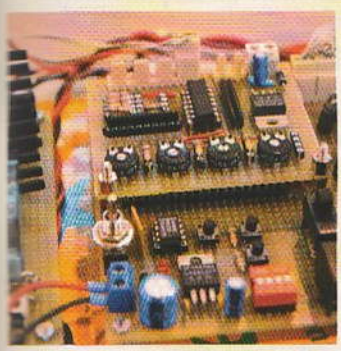
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



15

El amplificador operacional



Gracias a la realimentación se consigue mejorar la distorsión en frecuencia y la distorsión alineal, así como ampliar el ancho de banda del amplificador. Además se consiguen valores más adecuados de las resistencias de entrada y salida del amplificador.

En esta unidad didáctica conoceremos el amplificador operacional integrado, en el cual se aplican, habitualmente, las técnicas de realimentación para su funcionamiento.

Contenido

15.1. **Distorsión en los amplificadores**
15.2. **Realimentación en los amplificadores**
15.3. **El amplificador operacional**
15.4. **Aplicaciones de los amplificadores operacionales**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Conocer los diferentes tipos de distorsión que puede provocar un amplificador.
- Utilizar la realimentación en los amplificadores para mejorar su respuesta y disminuir la distorsión.
- Reconocer las características de un amplificador operacional.
- Construir circuitos con amplificadores operacionales.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

15.1 Distorsión en los amplificadores

Como ya se pudo comprobar en unidades didácticas anteriores, sin un adecuado diseño del amplificador, la señal de salida de éste puede que no responda exactamente a la aplicada a la entrada, en este caso nos encontramos ante el efecto indeseable de la distorsión.

La distorsión en la señal de salida es debida, básicamente, a que los componentes con los que se diseña el amplificador poseen unas características que no son del todo lineales. A esto hay que añadir las capacidades parásitas que se originan en los diferentes elementos del amplificador, así como las que corresponden a los condensadores utilizados en el circuito.

Dependiendo del factor que origina la distorsión, ésta puede modificar algunas de las magnitudes propias de la señal. Así, tenemos tres tipos de distorsión: distorsión alineal, distorsión de frecuencia y distorsión de fase.

15.1.1. Distorsión alineal

Ésta se produce por la alinealidad de los componentes utilizados, sobre todo, con los cambios de temperatura, lo que da como resultado una amplitud de la señal en la salida que no se corresponde exactamente con la de entrada en algunas partes del ciclo.

15.1.2. Distorsión de frecuencia y ancho de banda de un amplificador

Por lo general, cuando se amplifica una señal, ésta no consta únicamente de una sola frecuencia, sino que está compuesta por la suma de un gran número de señales de diferentes frecuencias. Éste es el caso, por ejemplo, de una señal de audio que provenga de un micrófono: las señales eléctricas que éste produce recogen sonidos a muy distintas frecuencias, como el de las diferentes voces, instrumentos de cuerda y de viento, percusión, etc. Para que el amplificador sea fiel con la señal de entrada, deberá aplicar la misma ganancia a las distintas frecuencias para, posteriormente, aplicarlas a un altavoz. En el caso de que el amplificador no consiga amplificar adecuadamente las muy bajas frecuencias o las muy altas, se producirá una distorsión de frecuencia, que dará como resultado una pérdida de calidad en el sonido entregado por el altavoz.

Esta distorsión es debida, fundamentalmente, a las capacidades que aparecen en los circuitos del amplificador, y que limitan su campo de actuación a una determinada gama de frecuencias. Así, tenemos que la ganancia de un amplificador se mantiene igual para un margen de frecuencias intermedias contenidas entre dos límites: superior (f_{c1}) e inferior (f_{c2}), denominadas frecuencias de corte. A la gama de frecuencias comprendida entre estos dos límites se la denomina *ancho de banda* (véase Figura 15.1).

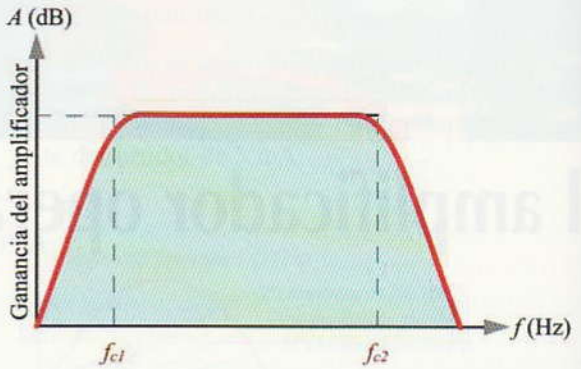


Figura 15.1. Ancho de banda de un amplificador.

Seguidamente, vamos a estudiar un ejemplo de cómo un amplificador puede provocar distorsión de frecuencia.

En la Figura 15.2 se muestra un amplificador de emisor común.

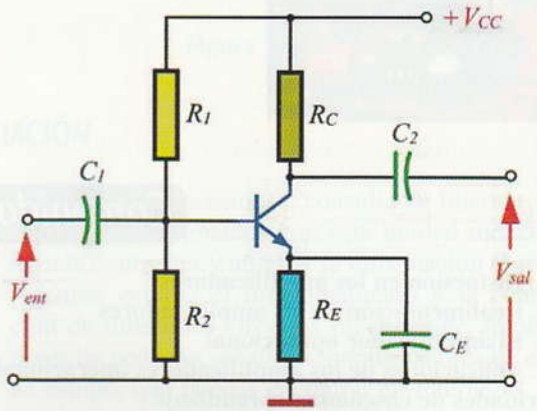


Figura 15.2. Amplificador de emisor común.

El condensador de entrada C_1, el de salida C_2 y el de acoplamiento del emisor C_E presentan una alta reactancia capacitiva para las bajas frecuencias ($X_C = 1/2\pi fC$). Dado que éstos están acoplados en serie con la señal de salida, ésta queda atenuada para dichas frecuencias, con lo que queda reducida la ganancia del amplificador para las bajas frecuencias (Figura 15.3). Llamaremos f_{c1} a la frecuencia de corte inferior; por debajo de ésta la ganancia es inferior a la de las frecuencias intermedias, tal como se muestra en el gráfico de la Figura 15.1.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

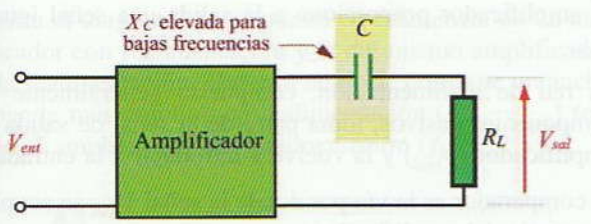


Figura 15.3. Reactancia equivalente a los condensadores de paso y acoplamiento.

Por otro lado, en el interior del transistor se forman una serie de capacidades entre sus electrodos, que actúan como si fuesen condensadores conectados en paralelo con la carga (véase la Figura 15.4). Para las frecuencias bajas, la reactancia capacitiva generada ($X_{C'} = 1/2\pi fC'$) se hace muy alta y, por lo tanto, ésta no interfiere en la señal de salida. Sin embargo, cuando la frecuencia aumenta por encima de la frecuencia de corte superior f_{c2}, dicha reactancia disminuye y provoca una especie de cortocircuito de la señal en la salida. En conclusión, la ganancia del amplificador disminuye al superarse esta frecuencia, por lo que puede llegar a anular la señal en la salida para muy altas frecuencias.

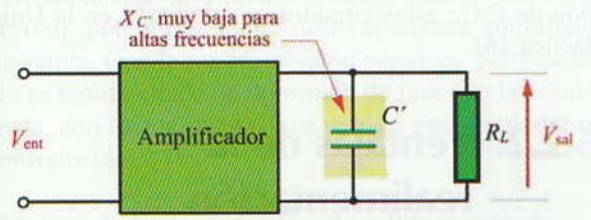


Figura 15.4. Reactancia capacitiva equivalente a la formada entre los electrodos del transistor.

En resumen, un amplificador posee una ganancia máxima en la banda media, es decir entre las frecuencias de corte f_{c1} y f_{c2}. Así, podemos definir el ancho de banda de un amplificador como:

$$\text{Ancho de banda} = f_{c2} - f_{c1}$$

Así, por ejemplo, si un amplificador posee una $f_{c1} = 20$ Hz y una $f_{c2} = 20$ kHz, su ancho de banda será:

$$\text{Ancho de banda} = 20.000 - 20 = 19.980 \text{ Hz}$$

En función de este criterio se pueden clasificar los amplificadores en *amplificadores de banda ancha* y *amplificadores de banda estrecha*.

Los amplificadores de banda ancha son aquellos que son capaces de amplificar una gran variedad de frecuencias sin provocar distorsión, como por ejemplo 15 MHz.

Los amplificadores de banda estrecha poseen un pequeño ancho de banda. Tal es el caso de los amplificadores sintonizados utilizados en radiofrecuencia.

15.1.3. Distorsión de fase

Esta distorsión hace que la señal de salida quede desfasada un cierto ángulo respecto a la de entrada. Al igual que la distorsión de frecuencia, este tipo de distorsión está provocada por las capacidades del circuito. Aquí también existe un ancho de banda entre el cual no se produce la distorsión. En la Figura 15.5, se muestra un diagrama en el que se relaciona el ángulo de desfase entre la señal de salida y la de entrada en función de la frecuencia de la señal.

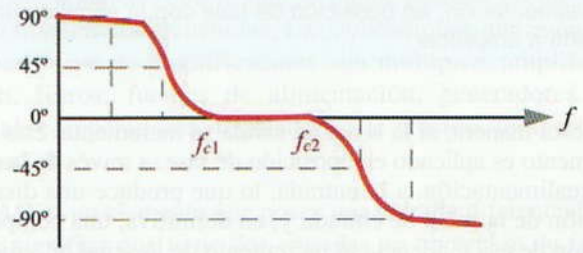


Figura 15.5. Diagrama donde se aprecia la distorsión de fase.

Para las frecuencias inferiores a f_{c1}, la señal de salida se adelanta respecto a la de entrada. Para frecuencias altas, superiores a f_{c2}, la señal de salida se retrasa respecto a la de entrada.

15.2 Realimentación en los amplificadores

La ganancia de un amplificador depende de las características de sus componentes. De tal forma que si, por alguna razón, un componente modifica su valor (cambios de temperatura, inexactitud en los valores de los componentes al ser sustituidos, etc.), el amplificador modifica su ganancia, entregando una señal en la carga diferente a la esperada. Además, se pueden producir fenómenos que causen distorsión en la señal de salida, como ruidos, atenuación de señales de baja o alta frecuencia, etc.

Un procedimiento para reducir estos fenómenos es la inclusión de una red de realimentación. La realimentación toma parte de la señal de salida y la retorna de nuevo a la entrada, consiguiendo que la señal de salida no dependa exclusivamente de las características de los componentes del amplificador (véase la Figura 15.6). De esta forma, se

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

consigue eliminar la distorsión y estabilizar el funcionamiento del amplificador.

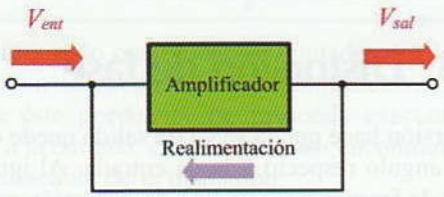


Figura 15.6. Realimentación en un amplificador.

El procedimiento que más se emplea para conseguir reducir la distorsión es la realimentación negativa. Consiste en tomar una parte de la tensión o corriente de la salida del amplificador y aplicarla, a través de la red de realimentación, en oposición de fase con la señal de entrada a amplificar.

De esta manera, si la señal de salida se incrementa, este incremento es aplicado en oposición de fase, a través de la red de realimentación, a la entrada, lo que produce una disminución de la señal de entrada y, en definitiva, una compensación de esa tendencia al incremento de la señal de salida.

Antes de realizar un estudio más detenido de la realimentación, vamos a aclarar una serie de ideas sobre la distorsión en los amplificadores.

15.2.1. Principio de realimentación

La realimentación consiste en introducir, intencionadamente o no, parte de la señal de salida de un amplificador (tensión o corriente) en su entrada.

En la Figura 15.7, se muestra en un diagrama de bloques el sistema empleado en un amplificador realimentado.

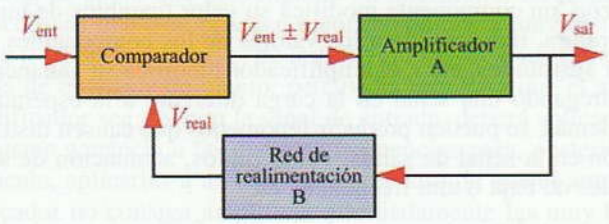


Figura 15.7. Diagrama de bloques de un amplificador realimentado.

V_{ent} es la señal que se introduce a la entrada del amplificador realimentado.

El amplificador proporciona a la salida una señal igual a V_{sal}.

La red de realimentación, compuesta generalmente por componentes pasivos, toma parte de la señal de salida del amplificador (V_{real}) y la vuelve a introducir a la entrada.

El comparador es la vía por donde la señal V_{real} se acopla a la entrada del amplificador.

Cuando la señal que se introduce en la entrada mediante la red de realimentación se resta con la señal de entrada, haciendo que ésta disminuya su valor, nos encontramos ante una **realimentación negativa**. En este caso la ganancia del amplificador realimentado disminuye respecto a la del amplificador sin realimentar.

En el caso de que la señal realimentada se sume a la señal de entrada, el amplificador aumenta la tensión de salida, proporcionando una **realimentación positiva**, lo que hace que la ganancia del amplificador realimentado aumente respecto al no realimentado.

La realimentación que más se utiliza para circuitos con fines amplificadores es la negativa, dejando la realimentación positiva para los osciladores (circuitos capaces de generar una señal alterna en la salida a partir de la alimentación de C.C.; estos circuitos se estudiarán en la Unidad didáctica 16).

15.2.2. Ventajas de la realimentación

Por ser la realimentación negativa la utilizada para conseguir efectos beneficiosos en los amplificadores, nos referiremos a ella en este caso. Las ventajas que se obtienen con el uso de la realimentación negativa son:

a) Mejora de la distorsión alineal

Dado que la ganancia de un amplificador depende de las características de sus componentes y que éstos no son lineales, se produce una distorsión en la señal de salida del amplificador.

Como la red de realimentación suele estar formada por resistencias, que son componentes bastante estables y lineales, la realimentación reduce considerablemente la distorsión alineal.

b) Mejora de la distorsión en frecuencia

Al reducir la realimentación negativa la ganancia de un amplificador, ésta permanece más estable para un mayor margen de frecuencias, con lo que se consigue aumentar el ancho de banda del amplificador. En la Figura 15.8 se

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

muestra el diagrama de respuesta en frecuencia de un amplificador con realimentación y la del mismo amplificador sin la realimentación. Observa cómo se consigue un ancho de banda más amplio con realimentación ($f_{rc2} - f_{rc1}$) respecto al amplificador sin realimentación ($f_{c2} - f_{c1}$).

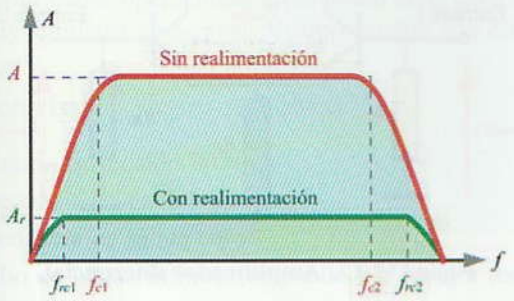


Figura 15.8. Respuesta en frecuencia de un amplificador con realimentación y sin ella.

c) Disminución del ruido

Supongamos que estamos trabajando con un amplificador de audio y que la señal recoge algún ruido (por ejemplo, el proveniente de una fuente de alimentación con rizado excesivo), por lo que dicho ruido aparecerá amplificado en la salida. Con la realimentación negativa, parte de este ruido es realimentado en oposición de fase con la señal de entrada, con lo que se consigue reducir gran parte del ruido introducido.

d) Mejora de las impedancias de salida y entrada

En muchos casos interesa proporcionar al amplificador una impedancia de salida o de entrada adecuada a la aplicación que se va a hacer de él. Así, por ejemplo, un amplificador de audio deberá poseer una baja impedancia de salida en su etapa final; de esta forma podremos entregar la máxima potencia a los altavoces que poseen una impedancia entre 4 y 8 Ω.

Dependiendo del procedimiento que utilicemos en la realimentación, podemos conseguir aumentar o disminuir las impedancias de entrada o salida de los amplificadores.

En un amplificador realimentado con el procedimiento corriente en serie y corriente en paralelo se consigue un aumento en la impedancia del amplificador y una disminución para los procedimientos tensión en paralelo y tensión en serie.

La impedancia de salida aumenta para los procedimientos corriente en serie y tensión en serie y disminuye para los de corriente en paralelo y tensión en paralelo.

15.3 El amplificador operacional

Una de las grandes aplicaciones que se hace de la realimentación, tanto negativa, como positiva, es en los amplificadores operacionales (AO).

Un amplificador operacional es un ejemplo de un amplificador fabricado con las técnicas de los circuitos integrados. Este tipo de circuito ofrece a los diseñadores unas excelentes características a un precio reducido.

Con el uso de amplificadores operacionales, se pueden conseguir grandes ganancias de tensión para aplicaciones de baja potencia, con lo que se puede trabajar en un amplio margen de frecuencias. Las aplicaciones que encuentra este tipo de amplificadores son múltiples: amplificación, filtros, fuentes de alimentación, generadores de señal, comparadores, reguladores de tensión, temporizadores, etc.

El AO es un elemento que posee una entrada diferencial, lo que significa que tiene dos entradas en oposición de fase. En la Figura 15.9, se muestra el símbolo que se emplea para representar el AO, junto con uno de los encapsulados típicos en C.I.

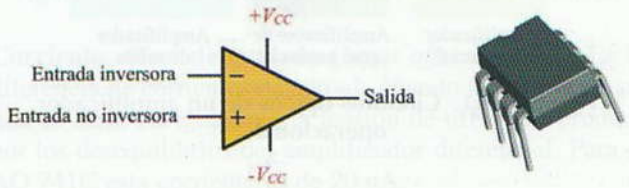


Figura 15.9. Representación esquemática del amplificador operacional y encapsulado.

Si aplicamos una señal a la entrada (−) inversora, obtendremos una señal en la salida en oposición de fase respecto a la aplicada a dicha entrada. Al contrario, si aplicamos la señal a la entrada (+) no inversora, la señal que se obtiene en la salida se mantiene en fase con la de entrada. Por otro lado, si aplicamos una señal entre ambos terminales de entrada, la señal obtenida en la salida es proporcional a la diferencia entre ambas señales.

Un amplificador operacional está compuesto por diferentes etapas, tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 15.10.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

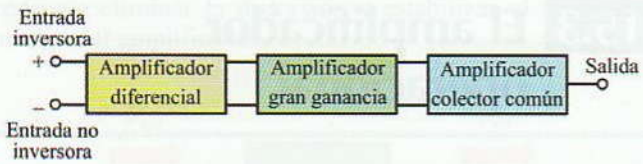


Figura 15.10. Diagrama de bloques de un amplificador operacional.

La primera etapa consta de un amplificador diferencial; elemento esencial para conseguir que la señal de salida dependa de la diferencia de las señales aplicadas a la entrada. La segunda etapa amplificadora es la que proporciona una alta ganancia. Por último, existe una etapa amplificadora, habitualmente en colector común, que proporciona una baja impedancia de salida. En la Figura 15.11, se puede apreciar los circuitos típicos de un AO.

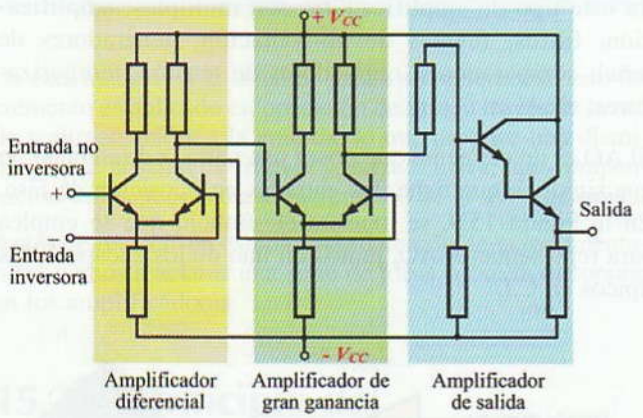


Figura 15.11. Circuitos típicos de un amplificador operacional.

15.3.1. El amplificador diferencial

El amplificador diferencial posee dos entradas y una salida. La señal que se obtiene a su salida es el resultado de la diferencia de las señales que se aplican a las entradas. En cierta forma este amplificador elimina o rechaza las partes comunes de las señales aplicadas a su entrada.

En la Figura 15.12, se muestra el circuito de un amplificador diferencial elemental.

Para la alimentación del circuito, es necesario utilizar una fuente de alimentación doble que proporciona las tensiones $+V_{CC}$ y $-V_{EE}$ de diferente polaridad y que proporcione una intensidad constante. Los transistores T_1 y T_2 son exactamente iguales y están polarizados en el mismo punto de trabajo.

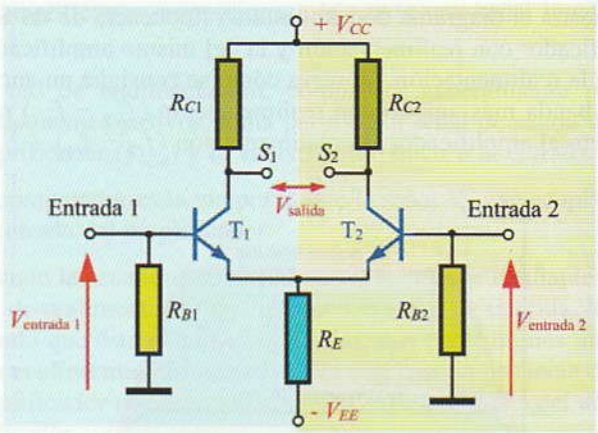


Figura 15.12. Amplificador diferencial.

La tensión que aparece en la salida (V_{salida}) del amplificador se obtiene de la diferencia de las tensiones de salida V_{s1} y V_{s2} que aparecen en cada uno de los colectores de los transistores T_1 y T_2.

$$V_{salida} = V_{s1} - V_{s2}$$

Dado que la ganancia de los dos transistores es idéntica, en la salida se obtiene una tensión proporcional a la diferencia de las tensiones de entrada.

Ganancia diferencial (A_{dif}): Es la que consigue el amplificador, trabajando con la diferencia de señales de entrada. Esta ganancia suele ser muy elevada.

Ganancia en modo común (A_{com}): Dado que es imposible construir amplificadores diferenciales que estén perfectamente equilibrados, es posible que aparezca una pequeñísima tensión en la salida, aunque las tensiones de entrada sean exactamente iguales. De esta forma, la ganancia en modo común es la que se produce con las señales que son comunes a las entradas del amplificador operacional. Por supuesto, esta ganancia suele ser muy pequeña.

Rechazo en modo común (CMRR): Es evidente que la calidad de un amplificador diferencial será mayor cuanto menor ganancia en modo común posea. Para poder medir el grado de rechazo de las señales de modo común se utiliza el parámetro «rechazo en modo común» que se obtiene de la relación entre la ganancia de tensión diferencial y la ganancia de tensión común. La expresión para calcularla en decibelios quedaría así:

$$\text{CMRR} = 20 \log \frac{A_{dif}}{A_{com}}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

15.3.2. Características del amplificador operacional

Un amplificador operacional ideal posee unas características muy similares a uno real. Veamos cuáles son éstas.

Características de un AO ideal

- Ganancia de tensión infinita.
- Impedancia de entrada infinita.
- Impedancia de salida cero.
- Ancho de banda infinito (responde por igual a todas las frecuencias).
- La señal de salida no se ve alterada por cambios de temperatura.
- Tensión de salida cero en ausencia de tensiones de entrada o lo que es lo mismo factor de rechazo común igual a cero.

Características de un AO real

En un amplificador operacional real estas características se acercan bastante. Para poder conocer con detalles a éstas, tendremos que consultar las hojas de especificaciones técnicas que nos facilitan los fabricantes. Seguidamente, explicamos las más significativas, tomando como ejemplo el AO comercial 741C.

Ganancia de tensión en lazo abierto (*Open loop voltaje gain*). Nos indica la ganancia del AO sin el uso de realimentación. Esta ganancia suele variar con la temperatura ambiente y con la frecuencia. Para el AO 741C la ganancia suele estar en torno a 200.000.

Impedancia de entrada (*Input impedance*). El valor de la impedancia de entrada de un AO es muy elevada, así por ejemplo para el 741C tenemos una impedancia de unos 2 MΩ. Esta impedancia tiende a crecer con la frecuencia, por lo que los fabricantes nos facilitan unas gráficas para consultar esta dependencia.

Impedancia de salida (*Ouput impedance*). Este valor suele ser muy bajo.

Ancho de banda (*Frecuency response*). El ancho de banda disminuye al aumentar la ganancia de tensión. Así por ejemplo, para el AO 741C el ancho de banda para una ganancia igual a la unidad (0 dB) es de 1 MHz, mientras que para una ganancia de 10.000 (80 dB) se reduce hasta los 100 kHz.

Rechazo en modo común CMRR (*Common-Mode Rejection Ratio*). Esta característica típica de los amplificadores diferenciales mide la capacidad del amplificador de rechazar las señales de modo común que aparecen en la entrada. El AO 741C posee un CMRR de 90 dB, lo que nos indica que el amplificador posee una ganancia 31.625 veces superior para las señales diferenciales que para las de modo común.

Tensión offset de entrada (*Input offset voltage*). A poco desequilibrio que exista en el amplificador diferencial del AO, éste presentará una muy débil tensión de salida en ausencia de tensión de entrada. La tensión de offset de entrada es la tensión que hay que aplicar a la entrada para eliminar dicha tensión de salida y hacer que la misma sea cero.

Así, por ejemplo, para el AO 741C la tensión offset de entrada es de 2 mV.

La mayor parte de los AO comerciales llevan incluidos un par de terminales para conectar un circuito de corrección de offset, tal como se indica en la Figura 15.13. Hoy en día existen AO comerciales que corrigen automáticamente este efecto.

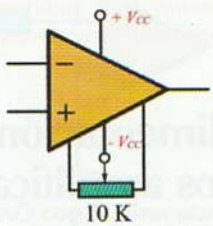


Figura 15.13. AO con circuito de corrección de offset.

Corriente offset de entrada (*Input offset current*). Es la diferencia de corrientes de entrada cuando la tensión de salida es cero. Al igual que la tensión de offset, se produce por los desequilibrios del amplificador diferencial. Para el AO 741C esta corriente es de 20 nA.

Corriente de polarización media de entrada (*Input bias current*). Es la pequeña corriente que necesita el amplificador diferencial para polarizarse. En el AO 741C esta corriente está en torno a los 80 nA. El uso de transistores FET en esta etapa amplificadora reduce sensiblemente estos valores.

Corriente de salida en cortocircuito (*Output short-circuit current*). Es la corriente máxima que puede proporcionar el AO. Para el AO 741 C esta corriente es de 25 mA.

Tensiones de alimentación (*Supply voltage*). Son las tensiones con las que se alimenta al AO. Para el AO 741C estas tensiones son de ±18 V.

Seguidamente, incluimos como ejemplo algunas características más del AO 741C.

Tensión diferencial de entrada (*Diferential input voltage*): ±30 V.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tensión de entrada (*Input voltage range*): ±15 V.

Potencia disipada: (*Power dissipation*): 500 mW.

Rango de temperaturas de funcionamiento (*Operating free-air temperature range*): 0 a 70 °C.

En la Figura 15.14 se muestra, a modo de ejemplo, el aspecto de un AO 741C encapsulado en forma de circuito integrado, con la denominación de todos sus terminales.

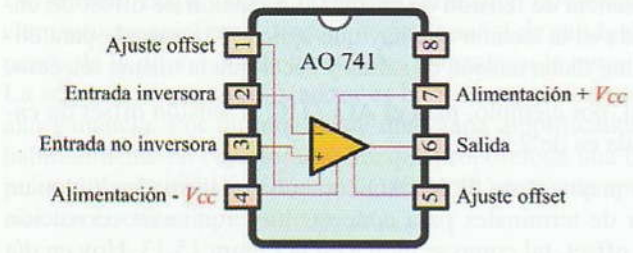


Figura 15.14. Conexiones internas del AO 741C.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del amplificador operacional comercial LM741.*

15.3.3. Realimentación en los amplificadores operacionales

La forma habitual de trabajo de un AO es mediante las técnicas de realimentación negativa, dejando la realimentación positiva para los circuitos en los que se desea generar un estado de oscilación, como es el caso de los generadores de señal.

La ganancia de un amplificador operacional integrado para señales de bajas frecuencia es muy elevada, pero muy inestable a los cambios de dicha frecuencia. Por esta razón, conviene disponer de menor ganancia a cambio de una mayor estabilidad dentro de unos límites de frecuencia más grandes. La forma de conseguir esto último es utilizando la realimentación negativa. Esta técnica consiste en tomar una parte de la señal de la salida del amplificador e introducirla de nuevo por la entrada inversora.

En el caso de que la señal de realimentación se introdujese por la entrada no inversora se trataría entonces de una realimentación positiva.

En la Figura 15.15, se muestra la relación existente entre la frecuencia y la ganancia de un amplificador operacional sin realimentación (bucle abierto) y con realimentación negativa (bucle cerrado). En este diagrama se observa cómo, en un AO sin realimentar, la ganancia disminuye drásticamente para frecuencias superiores a 10 Hz, mientras que si hay realimentación, la ganancia se mantiene estable hasta los 100 kHz.

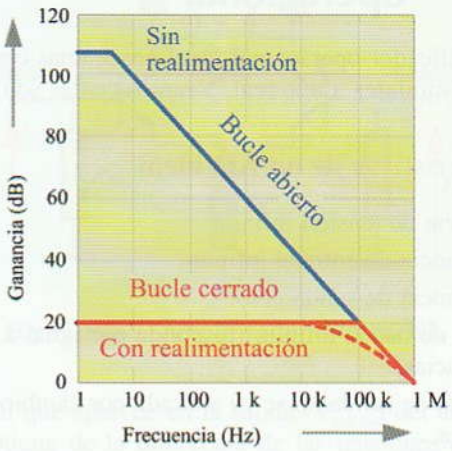


Figura 15.15. Ganancia de una AO con realimentación y sin ella.

Al igual que ocurría con los amplificadores construidos con transistores de unión, existen cuatro técnicas diferentes para la realimentación negativa de un AO.

15.3.3.1. AO con realimentación no inversora de tensión

En la Figura 15.16 se muestra el circuito correspondiente a esta técnica de realimentación.

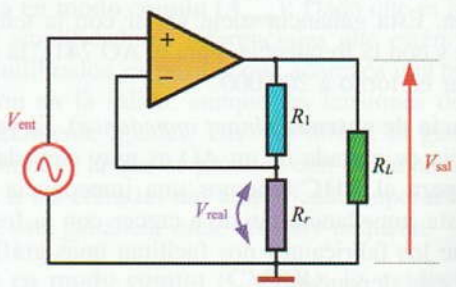


Figura 15.16. AO con realimentación no inversora de tensión.

La señal a amplificar (V_{ent}) se aplica a la entrada no inversora de tensión y la realimentación (V_{real}) se realiza tomando una parte de la tensión de salida (V_{sal}), que es aplicada a la entrada inversora del amplificador operacional. Como se puede apreciar en el circuito de la Figura 15.16, la tensión de realimentación se consigue mediante el divisor de tensión formado por R_1 y R_r, al que se le ha aplicado la tensión de salida. Así, se consigue que la tensión V_{real}, que

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

aparece en los terminales de R_r, sea proporcional a la de salida.

Esta forma de realimentación es una de las más sencillas y con ella se consigue una buena estabilidad, una resistencia de entrada alta y una resistencia de salida baja, lo que le convierte en un sistema muy adecuado para amplificadores lineales.

La ganancia de tensión de un amplificador operacional sin realimentación es bastante elevada. Con la realimentación negativa se consigue estabilizar la ganancia y aumentar el ancho de banda a costa de reducir esta ganancia. La ganancia a bucle cerrado depende, en gran manera, de la red de realimentación, pudiéndose decir, con bastante aproximación, que:

$$A_{V(LC)} \cong 1 + \frac{R_1}{R_r}$$

Actividad resuelta 15.1

Se desea calcular el valor que habrá de tener la resistencia de realimentación del circuito amplificador con realimentación no inversora de tensión de la Figura 15.17, si deseamos obtener a la salida una tensión de 10 V cuando apliquemos una señal de entrada de 99 mV.

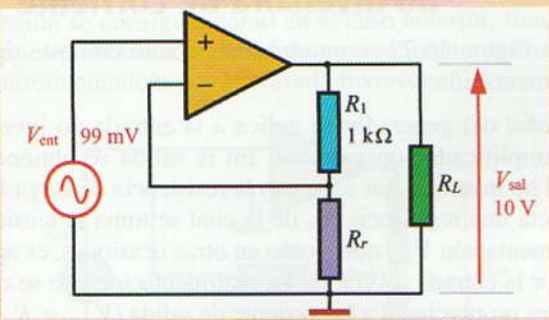


Figura 15.17.

Solución: Primero calculamos la ganancia de tensión a la que debe trabajar el amplificador:

$$A_{V(LC)} = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{10}{0{,}099} = 101$$

De la expresión de la ganancia a bucle cerrado expuesta para este amplificador se deduce que la resistencia de realimentación es igual a:

$$R_r = \frac{R_1}{A_{V(LC)} - 1} = \frac{1.000}{101 - 1} = 10\ \Omega$$

15.3.3.2. AO con realimentación inversora de tensión

En la Figura 15.18, se muestra un amplificador con realimentación inversora de tensión.

La señal a amplificar (V_{ent}) se aplica a la entrada inversora a través de la resistencia R_1, por lo que la señal de salida aparecerá invertida. La resistencia R_r toma una muestra de la tensión de salida y la introduce por la entrada inversora.

Este sistema de realimentación posee una impedancia de entrada bastante baja y por esta razón se le conecta, en serie con el generador de señales, una resistencia R_1 que evita las sobrecargas de éste.

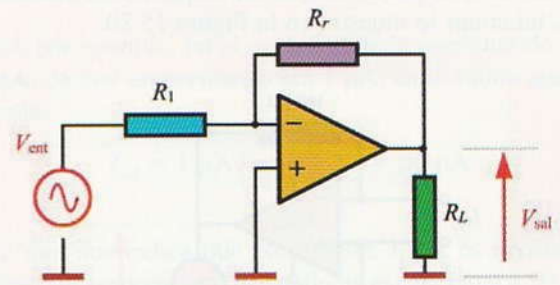


Figura 15.18. AO con realimentación inversora de tensión.

La ganancia de tensión a lazo cerrado está condicionada en este caso por las resistencias R_1 y R_r, de tal forma que se cumple la siguiente relación:

$$A_{V(LC)} = -\frac{R_r}{R_1}$$

El signo negativo indica que existe inversión de fase entre la entrada y la salida.

Si al AO de la Figura 15.18 se le suprime la resistencia R_1, su impedancia de entrada tiende a cero. Dado que su impedancia de salida es también muy próxima a cero, éste se comporta como un convertidor ideal de corriente a tensión. En la Figura 15.19 se muestra el circuito mencionado.

En estas condiciones se cumple que:

$$V_{sal} = R_r \cdot I_{ent}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

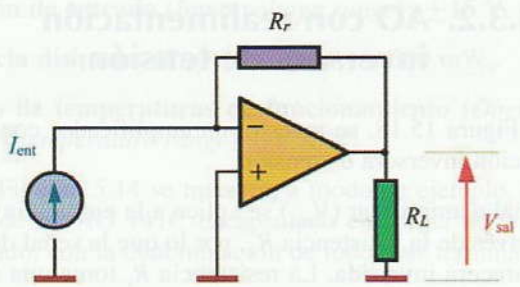


Figura 15.19. AO como convertidor ideal de corriente a tensión.

Actividad resuelta 15.2

Aprovechando las propiedades del convertidor de corriente a tensión del AO con realimentación inversora de tensión, se puede diseñar un amperímetro electrónico, tal como se muestra en la Figura 15.20.

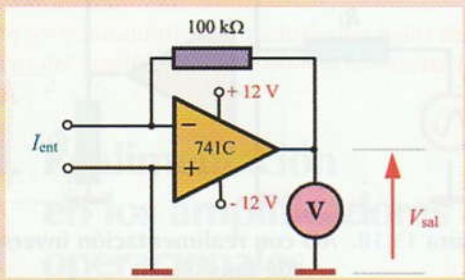


Figura 15.20. Amperímetro electrónico con AO.

Supongamos que las intensidades que deseamos medir sean de 100 μA. Para este valor tan bajo de corriente, sería necesario un amperímetro de gran sensibilidad, con el consiguiente coste adicional. Utilizando la entrada del amplificador operacional de la Figura 15.20 como puntas de prueba de un amperímetro, se pueden obtener tensiones proporcionales a la corriente a través de un voltímetro.

En este caso el máximo alcance del voltímetro a utilizar será:

$$V_{sal} = R_r \cdot I_{ent} = 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 10 \text{ V}$$

La constante del voltímetro será:

$$K = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ μA}} = 0{,}1 \text{ V/μA}$$

Es decir, por cada 0,1 V que indica el voltímetro, la corriente medida es de 1 μA.

Actividad resuelta 15.3

Al amplificador de la Figura 15.21 se aplica una tensión de entrada de 10 mV. Calcula la tensión que aparecerá en la resistencia de carga de la salida.

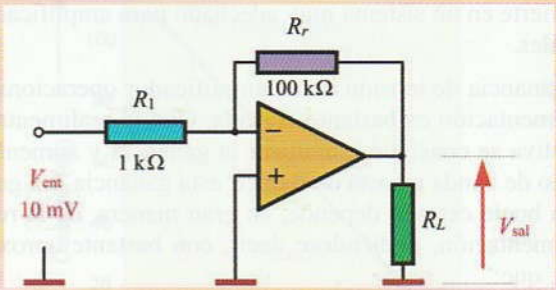


Figura 15.21.

Solución: La ganancia obtenida con este amplificador será igual a:

$$A_{V(LC)} = -\frac{R_r}{R_1} = -\frac{100}{1} = -100$$

La tensión en la salida será igual a

$$V_{sal} = A_{V(LC)} \cdot V_{ent} = -100 \cdot 0{,}01 = -1 \text{ V}$$

15.3.3.3. AO con realimentación no inversora de corriente

En la Figura 15.22 se muestra un circuito con este tipo de realimentación.

La señal del generador se aplica a la entrada no inversora del amplificador operacional. En la salida se obtiene una señal no invertida. En serie con la resistencia de carga R_L, se conecta una resistencia R_r, de la cual se toma la tensión de realimentación V_{real} que, como en otras ocasiones, es aplicada por la entrada inversora. La realimentación que se consigue, es proporcional a la corriente de salida ($V_{real} = R_r \cdot I_{sal}$).

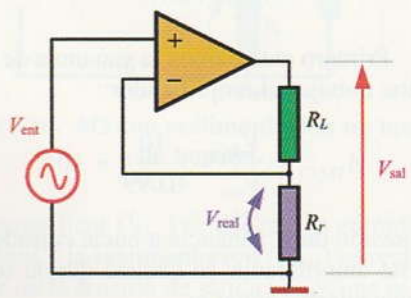


Figura 15.22. AO con realimentación no inversora de corriente.

Un amplificador con realimentación no inversora de corriente posee una resistencia de entrada y salida muy ele-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

vada, por lo que se puede considerar como un convertidor ideal de tensión corriente. Además, se cumple que:

$$I_{sal} \cong \frac{V_{ent}}{R_r}$$

Este tipo de circuito se utiliza en instrumentación para la construcción de voltímetros muy sensibles como convertidor de tensión a corriente. En la Figura 15.23 se muestra un ejemplo.

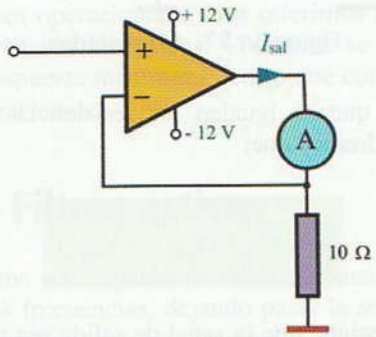


Figura 15.23. Voltímetro sensible con AO.

15.3.3.4. AO con realimentación inversora de corriente

En este caso (véase la Figura 15.24) la señal se aplica a la entrada inversora del amplificador operacional. La realimentación se consigue, como en el caso anterior, tomando una muestra de la señal de salida proporcional a la corriente e introduciéndola por la entrada inversora.

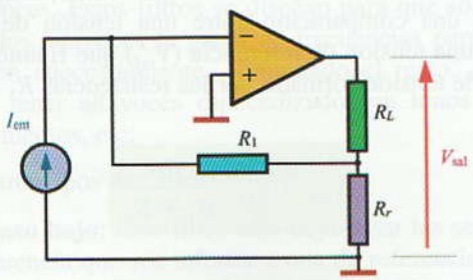


Figura 15.24. AO con realimentación inversora de corriente.

Este tipo de realimentación hace que el amplificador trabaje como un amplificador de corriente ideal y su impedancia de entrada es cero e infinita la de salida.

En este amplificador se cumple la siguiente relación:

$$I_{sal} = I_{ent}\left(\frac{R_1}{R_r} + 1\right)$$

Expresión que nos indica que la corriente de salida es proporcional a la de entrada.

Actividad resuelta 15.4

Con este sistema de realimentación se puede construir un amperímetro sensible, tal como se muestra en la Figura 15.25.

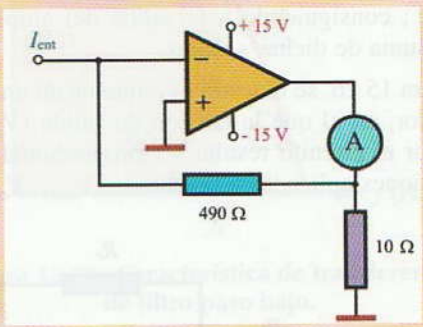


Figura 15.25. Amperímetro sensible con AO.

Así, por ejemplo, en el caso de que la corriente de entrada de este amperímetro sea 1 μA, en la salida aparecerán:

$$I_{sal} = 1\ \mu A\left(\frac{490}{10} + 1\right) = 50\ \mu A$$

Lo que nos indica que para medir 1 μA es necesario situar un amperímetro de fondo de escala igual a 50 μA en la salida.

15.4 Aplicaciones de los amplificadores operacionales

Existe una gran multitud de aplicaciones con amplificadores operacionales, dado que éstos poseen unas excelentes prestaciones y resultan muy económicos en la mayor parte de los casos.

Este tipo de amplificadores responde bien a las bajas frecuencias y su ganancia de tensión se puede ajustar, de una forma muy simple, utilizando las técnicas de realimentación negativa. Para aplicaciones en altas frecuencias, ya no son tan eficaces, pero existe una gama especial para estos casos que da muy buenos resultados.

Una de las aplicaciones que poseen los amplificadores operacionales es la de realizar operaciones matemáticas, como la de suma, resta, diferenciación e integración.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

15.4.1. Amplificador sumador

Con este circuito se puede construir, por ejemplo, un mezclador de audio. Para ello inyectaríamos a las entradas las señales variables provenientes de micrófonos, lectores de discos, etc.; consiguiendo a la salida del amplificador la mezcla o suma de dichas señales.

En la Figura 15.26, se muestra el esquema de un amplificador sumador, en el que la tensión de salida (V_{sal}) proporcionada por el circuito resulta ser proporcional a la suma de las tensiones aplicadas a la entrada ($V_{ent\,1}$, $V_{ent\,2}$).

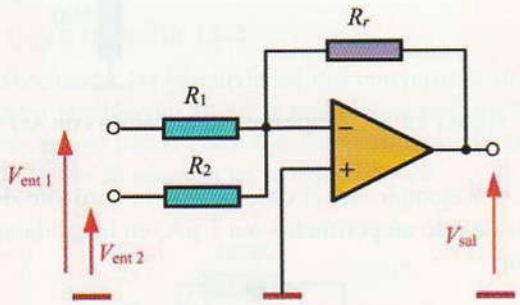


Figura 15.26. AO sumador.

Si observamos detenidamente el circuito, se puede apreciar que éste está formado por un amplificador inversor por cada una de las entradas. En este caso se cumple la expresión:

$$V_{sal} = -\left(V_{ent\,1}\frac{R_r}{R_1} + V_{ent\,2}\frac{R_r}{R_2}\right)$$

En el caso de que las dos resistencias de la entrada sean iguales ($R_1 = R_2 = R$), tendremos que:

$$V_{sal} = -\frac{R_r}{R}(V_{ent\,1} + V_{ent\,2})$$

Así, por ejemplo, para construir un mezclador de señales de audio, sustituiríamos las resistencias fijas de entrada R_1 y R_2 por potenciómetros, consiguiendo así diferentes ganancias para cada una de las señales de entrada.

15.4.2. Amplificador restador

En el circuito de la Figura 15.27, se consigue que la tensión de salida sea proporcional a la resta de las tensiones aplicadas a la entrada.

En este caso la tensión de salida cumple la siguiente expresión:

$$V_{sal} = \frac{R_x}{R_2 + R_x}\cdot\frac{R_1 + R_r}{R_1}\cdot V_{ent\,2} - \frac{R_r}{R_1}\cdot V_{ent\,1}$$

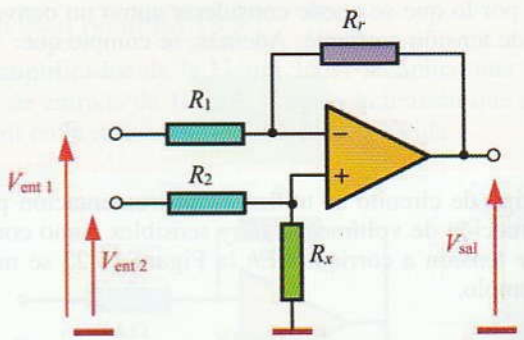


Figura 15.27. AO restador.

Si hacemos que se igualen las resistencias: $R_1 = R_2$ y $R_x = R_r$, tendremos que:

$$V_{sal} = \frac{R_r}{R_1}(V_{ent\,2} - V_{ent\,1})$$

Donde se consigue que la señal de salida sea proporcional a la diferencia de las señales de entrada.

¿Qué habría que hacer para conseguir que esta proporción sea igual a la unidad?

15.4.3. Comparadores

Este tipo de circuitos construidos a partir de amplificadores operacionales, como el de la Figura 15.28, consigue establecer una comparación entre una tensión de entrada (V_{ent}) y una tensión de referencia (V_{ref}) que fijamos con el divisor de tensión formado por las resistencias R_1 y R_2:

$$V_{ref} = V_{CC}\cdot\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

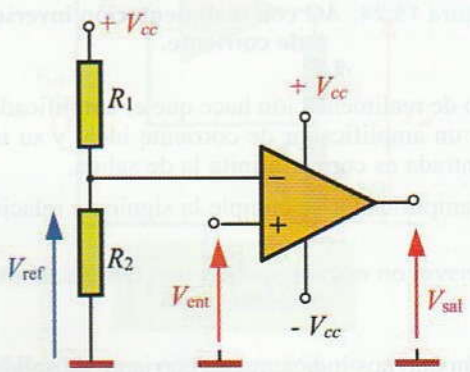


Figura 15.28. AO comparador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En este circuito se cumple que, cuando la tensión de entrada es superior a la de referencia que hemos fijado, la tensión de salida se hace máxima ($V_{máx}$) (entre uno y dos voltios inferior a la tensión de alimentación V_{CC}). En este caso se dice que el amplificador se ha saturado. Para tensiones de entrada inferiores a la de referencia, en la salida del amplificador se presenta una tensión cercana a la tensión negativa de la alimentación ($-V_{máx}$).

En la actualidad existen unos dispositivos que realizan la operación de comparación mucho más eficazmente que los amplificadores operacionales. Nos referimos a los comparadores de tensión integrados. Con ellos se consigue un tiempo de respuesta mucho más corto que con los amplificadores operacionales.

15.4.4. Filtros activos

Estos circuitos son capaces de constituir una barrera para determinadas frecuencias, dejando pasar la señal de la gama de frecuencias que nos interese y eliminando o atenuando el resto. Si estos filtros los constituimos con componentes pasivos (resistencias, bobinas y condensadores) la señal de salida obtenida en los mismos será siempre inferior a la de entrada. Con los filtros activos, construidos a partir de amplificadores operacionales, podemos conseguir aumentar con una cierta ganancia la señal de salida una vez filtrada.

Una aplicación típica de estos circuitos son los filtros que se colocan entre la salida de los amplificadores de audio y los altavoces. Estos filtros se diseñan para que sólo dejen pasar a los altavoces la gama de frecuencias para la que responden adecuadamente, eliminando el resto. Así, podríamos tener altavoces especializados en tonos graves, agudos, medios, etc.

Existen tres tipos de filtros:

Filtro paso bajo: Este filtro sólo deja pasar las señales de una frecuencia que sea inferior a una de referencia marcada, denominada «frecuencia de corte» (f_c), tal como se muestra en la característica de transferencia de la Figura 15.29.

En la Figura 15.30 se muestra el circuito de un filtro de paso bajo con amplificador operacional.

En este circuito se ha utilizado el montaje típico de un amplificador no inversor, al que se le ha conectado un circuito con una resistencia R y un condensador C (RC) a la entrada no inversora.

Para señales de entrada cuya frecuencia sea muy baja, la reactancia X_C del condensador se hace muy elevada ($X_C = 1/2\pi fC$) si la comparamos con el valor de R, por lo

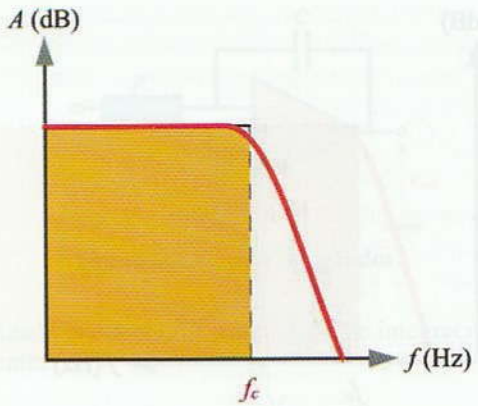


Figura 15.29. Característica de transferencia de filtro paso bajo.

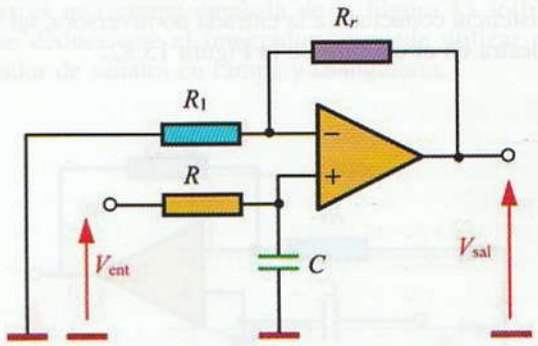


Figura 15.30. Filtro paso bajo con AO.

que prácticamente toda la señal de entrada aparece entre los terminales de C, con lo que se obtiene a la salida del amplificador una señal alta (obsérvese que el condensador está conectado directamente a la entrada no inversora del AO). Por el contrario, si la frecuencia es alta, la reactancia del condensador se hace muy baja y, por tanto, la tensión en este elemento se reduce drásticamente y, con ella, la tensión de salida del amplificador.

El valor de la frecuencia de corte (f_c) se establece cuando se igualan la reactancia del condensador X_C con el valor óhmico de la resistencia R.

$X_C = R$, de donde resulta que:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Filtro paso alto: Este filtro se caracteriza porque sólo deja pasar las señales de una frecuencia superior a la de corte, tal como se muestra en la característica de transferencia de la Figura 15.31.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

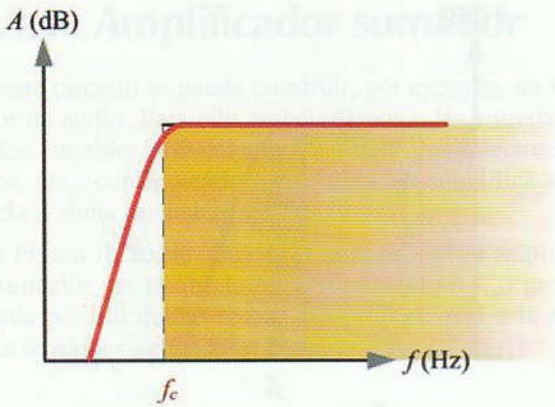


Figura 15.31. Característica de transferencia de filtro de paso alto.

En este caso se ha invertido la posición del condensador y la resistencia conectada a la entrada no inversora, tal como se muestra en el circuito de la Figura 15.32.

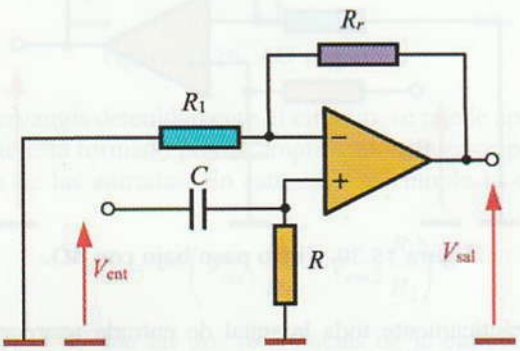


Figura 15.32. Filtro paso alto con AO.

Aplicando el mismo razonamiento que para el filtro de paso bajo, ahora el condensador actúa como un cortocircuito para las señales de entrada de alta frecuencia. Sin embargo, para las frecuencias inferiores a la de corte, la reactancia se hace muy elevada, por lo que la señal aplicada a la entrada queda bloqueada por éste. La frecuencia de corte se calcula exactamente igual que en filtro de paso bajo.

Filtro paso banda: El filtro paso banda se construye con una combinación del filtro paso alto y el filtro paso bajo como el de la Figura 15.33.

Aquí se consigue que sólo aparezcan en la salida las señales de entrada que estén comprendidas entre la frecuencia de corte inferior (f_{c1}) y la superior (f_{c2}), tal como se muestra en la característica de transferencia de la Figura 15.34.

La frecuencia de corte inferior f_{c1} se calcula como siempre, pero teniendo en cuenta los valores de R_1 y C_1. De igual forma se calcula la superior f_{c2} con los valores de R_2 y C_2.

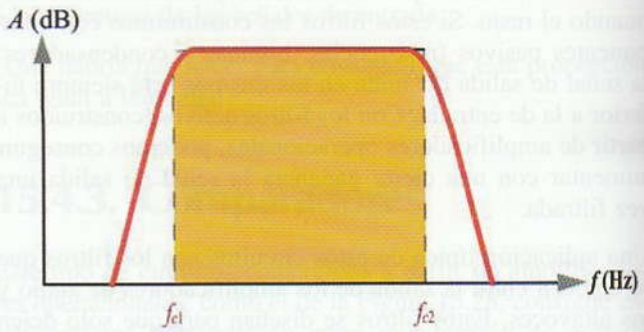


Figura 15.34. Característica de transferencia de un filtro de paso banda.

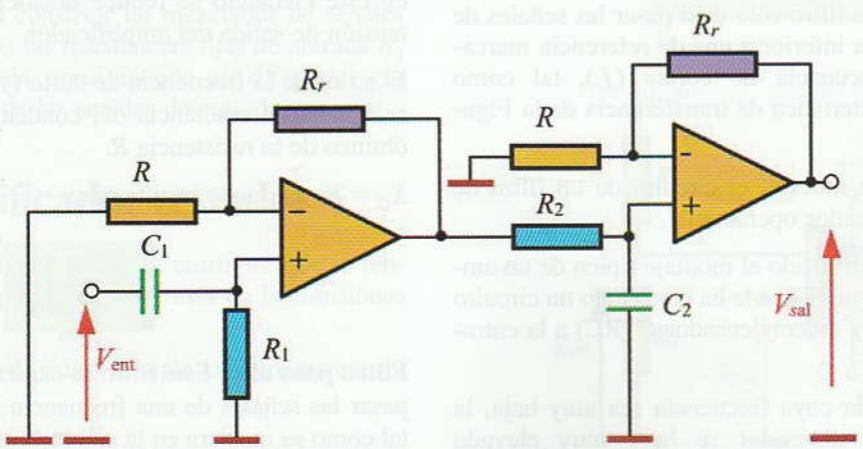


Figura 15.33. Filtro paso banda con AO.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 15.5

A un filtro de paso banda como el de la Figura 15.33 se le aplica una señal de audio a su entrada con una gama de frecuencias que va desde los 2 Hz hasta los 20 kHz. Se desea aplicar la señal a unos altavoces para que se realce el sonido de los tonos bajos. ¿Qué valor deberán poseer las redes RC del filtro, si queremos que el altavoz realce los tonos entre 25 Hz y 100 Hz?

Solución: Para el paso alto, la frecuencia de corte debe estar en 25 Hz.

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \rightarrow R_1 C_1 = \frac{1}{2\pi f_{c1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 25} = 6{,}37 \cdot 10^{-3}$$

Si tomamos para el condensador C_1 una capacidad de 1 μF, tendremos que:

$$R_1 = \frac{6{,}37 \cdot 10^{-3}}{C_1} = \frac{6{,}37 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 6.370\ \Omega$$

Para el paso bajo la frecuencia de corte está en 100 Hz:

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \rightarrow R_2 C_2 = \frac{1}{2\pi f_{c2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100} = 1{,}59 \cdot 10^{-3}$$

Para una capacidad de $C_1 = 1$ μF, tendremos que:

$$R_2 = \frac{1{,}59 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 1.590\ \Omega$$

15.4.5. Amplificadores integradores y diferenciadores

Con los AO se pueden construir circuitos que realicen las operaciones matemáticas de integral y derivada. Este tipo de circuitos proporciona a su salida una señal no lineal respecto a la entrada, por lo que pueden ser muy útiles para la generación de señales.

Integrador

En la Figura 15.35 se muestra el circuito de un integrador con AO, donde se ha sustituido la resistencia de realimentación en un amplificador no inversor por un condensador C. Aquí se cumple que la tensión de salida es proporcional a la integral de la tensión de entrada:

$$V_{sal} = -\frac{1}{RC}\int_0^t V_{ent}\,dt$$

Así por ejemplo, si la tensión que aplicamos a la entrada fuese constante, la tensión que obtenemos a la salida, una vez realizada la operación matemática de integración, sería la siguiente:

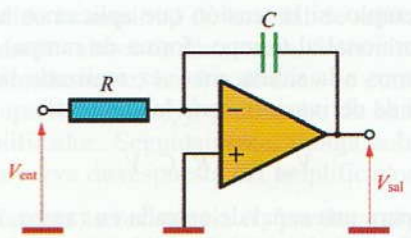


Figura 15.35. **AO integrador.**

$$V_{sal} = -\frac{V_{ent}}{RC}\,t$$

Lo que nos indica que para una señal de entrada constante, como la de la Figura 15.36(a), la señal de salida que se obtiene es una rampa como la de la Figura 15.36(b). De aquí se deduce que el integrador se puede utilizar como generador de señales en rampa y triangulares.

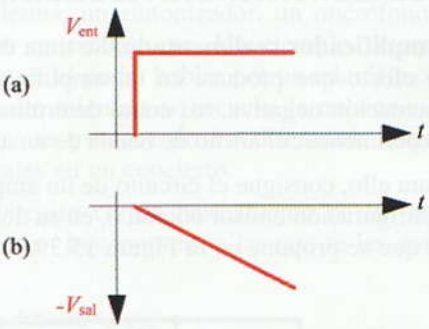


Figura 15.36. **Respuesta de un integrador a una señal de entrada constante.**

Diferenciador

En este circuito se conecta el condensador a la entrada no inversora, tal como se observa en la Figura 15.37. En este circuito la tensión de salida es proporcional a la derivada de la tensión de entrada:

$$V_{sal} = -RC\frac{dV_{ent}}{dt}$$

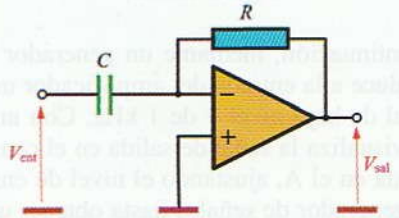


Figura 15.37. **AO diferenciador.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Así, por ejemplo, si la tensión que aplicamos a la entrada fuese proporcional al tiempo (forma de rampa), la tensión que obtenemos a la salida, una vez realizada la operación matemática de derivación, sería la siguiente:

$$V_{sal} = -R \cdot C \cdot V_{ent}$$

Por lo que para una señal de entrada en rampa, como la de la Figura 15.38(a), la señal de salida que se obtiene es un escalón como el de la Figura 15.38(b). En conclusión, con el diferenciador se pueden generar señales rectangulares a partir de señales en rampa.

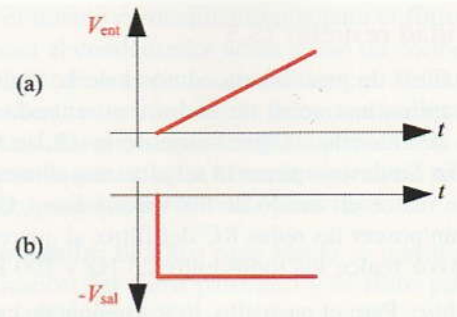


Figura 15.38. Respuesta de un diferenciador para una señal de entrada en rampa.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

15.1 Amplificador realimentado. Se trata de comprobar el efecto que produce en un amplificador la realimentación negativa, así como determinar, de forma experimental, el ancho de banda de un amplificador.

Para ello, consigue el circuito de un amplificador en configuración emisor común o, en su defecto, monta el que se propone en la Figura 15.39.

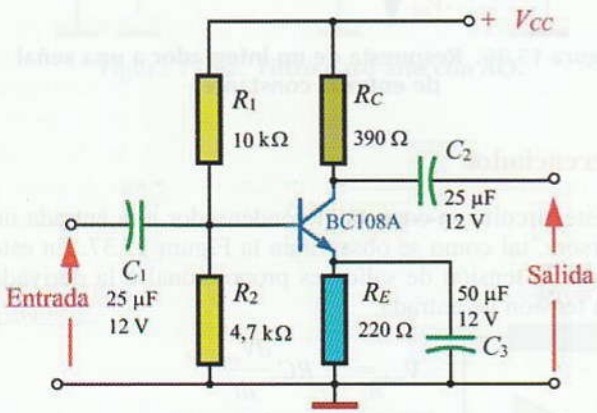


Figura 15.39.

A continuación, mediante un generador de señales, introduce a la entrada del amplificador una señal senoidal de bajo nivel y de 1 kHz. Con un osciloscopio, visualiza la señal de salida en el canal B y la de entrada en el A, ajustando el nivel de entrada de dicho generador de señales hasta obtener una señal de salida sin distorsión.

Una vez hecho esto, ve variando la frecuencia de la señal de entrada (desde unos pocos hercios hasta unos cuantos miles), sin variar la amplitud. Mide la amplitud de la señal de salida para diferentes valores de frecuencia, determinando, aproximadamente, las frecuencias de corte inferior y superior (f_{c1} y f_{c2}) y el ancho de banda del amplificador. Seguidamente, dibuja sobre el papel la curva de respuesta del amplificador.

Si ahora retiramos el condensador de paso C_3, el amplificador quedará realimentado negativamente con el procedimiento corriente en serie. Retira el condensador C_3 y repite las medidas del apartado anterior, determinando la nueva ganancia del amplificador, así como su ancho de banda.

Por último, compara los resultados obtenidos en la respuesta del amplificador con realimentación y sin ella.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del transistor BC108A.*

15.2 Análisis de un AO con realimentación inversora de tensión. Mediante este ejercicio práctico se pretende comprobar experimentalmente la dependencia de la ganancia del amplificador operacional comercial 741 al conectar una red de realimentación, así como comprobar su ancho de banda.

El circuito con el que realizaremos las comprobaciones es el de la Figura 15.40.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

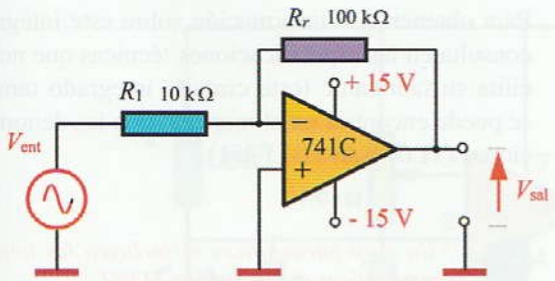


Figura 15.40. Circuito para el análisis de un AO.

a) Para comenzar, monta el circuito de la Figura 15.40 en el entrenador didáctico, reservando un lugar para colocar diferentes valores óhmicos a la resistencia R_1 de 1/2 W.

b) Sitúa una resistencia $R_1 = 2.200\ \Omega$; conecta el canal B de un osciloscopio a la salida del amplificador operacional y el canal A a la entrada.

c) Mediante un generador de señales, introduce una señal senoidal de 1 kHz de tal amplitud que no llegue a generar distorsión en la salida. Dibuja los oscilogramas correspondientes a la señal de salida y entrada, determinando la ganancia obtenida por el AO con los valores pico a pico. Compara este valor con el calculado teóricamente ($A_{V(LC)} = R_r/R_1$).

d) Una vez hecho esto, ve variando la frecuencia de la señal de entrada (desde unos pocos hertcios hasta unos cuantos miles), sin variar la amplitud. Mide la amplitud de la señal de salida para diferentes valores de frecuencia, determinando, aproximadamente, las frecuencias de corte inferior y superior (f_{c1} y f_{c2}) y el ancho de banda del amplificador. Seguidamente, dibuja sobre el papel la curva de respuesta del amplificador.

e) Cambia la resistencia R_1 por los valores 10 kΩ, 22 kΩ, 47 kΩ y 100 kΩ, comprobando el efecto que produce en la ganancia para una señal senoidal de 1 kHz.

15.3 Mezclador para audio. En la Figura 15.41 se muestra el circuito correspondiente a un mezclador de audio.

Tal como se puede observar en el circuito, con este mezclador podremos introducir tres señales de audio diferentes, con lo que se consigue a su salida una señal que será la suma de éstas. La utilidad de este pequeño mezclador es muy variada, ya que puede introducir señales preamplificadas provenientes de diferentes fuentes: una cabeza lectora de una pletina, un sintonizador, un micrófono, instrumentos musicales, etc. Un ejemplo de aplicación podría ser el poder hablar por un micrófono durante un evento mientras se escucha la música, o la mezcla que se produce de los diferentes instrumentos musicales en un concierto.

Este circuito consta básicamente de los siguientes elementos: tres entradas a las que se les conecta las

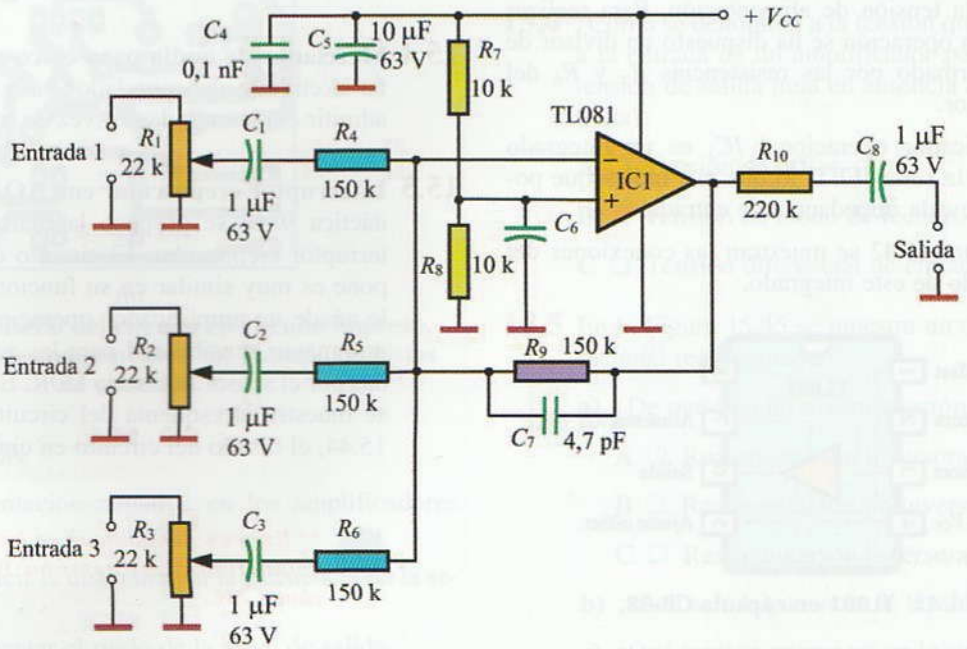


Figura 15.41. Mezclador de audio.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

diferentes señales a mezclar, tres potenciómetros (R_1, R_2, R_3) que se encargan de nivelar las señales de entrada según el efecto que se desee conseguir en el mezclado y un amplificador operacional (IC_1) que realiza la suma de todas las señales.

El amplificador operacional trabaja con realimentación inversora de tensión. Dicha realimentación se produce a través de la resistencia R_9 de 150 kΩ. Como las resistencias (R_4, R_5, R_6) aplicadas a la entrada son del mismo valor, la ganancia obtenida por el amplificador será de la unidad:

$$A_v = \frac{R_9}{R_4} = \frac{150\ \text{k}\Omega}{150\ \text{k}\Omega} = 1$$

La alimentación de este circuito se puede realizar con una tensión continua que esté comprendida entre 10 V y 30 V. Sin embargo, la mayoría de los circuitos que utilizan amplificadores operacionales necesitan de una fuente de alimentación simétrica que suministre una tensión doble de $\pm V_{CC}$ (por ejemplo, +15 V y −15 V). Este hecho complica notablemente el empleo de estos amplificadores, sobre todo si queremos hacer funcionar nuestro mezclador aprovechando la alimentación de un equipo de audio, que casi siempre resulta ser monopolar.

Este problema se ha solucionado en nuestro circuito conectando el terminal 4 de IC_1 a masa y el 7 a la tensión positiva de alimentación. Además se ha polarizado el terminal 3 (entrada no inversora) con la mitad de la tensión de alimentación. Para realizar esta última operación se ha dispuesto un divisor de tensión formado por las resistencias R_7 y R_8 del mismo valor.

El amplificador operacional IC_1 es un integrado TL081 de la serie JFET, lo que nos indica que posee una elevada impedancia de entrada.

En la Figura 15.42 se muestran las conexiones del encapsulado de este integrado.

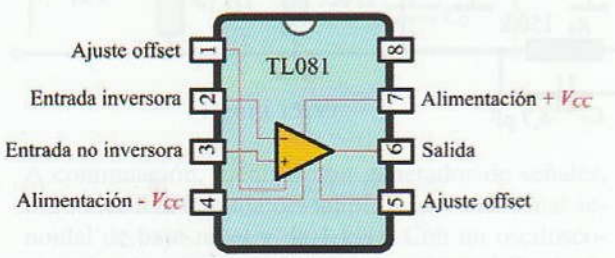


Figura 15.42. TL081 en cápsula CB-98.

Para obtener más información sobre este integrado, consulta en las especificaciones técnicas que nos facilita su fabricante (este circuito integrado también se puede encontrar en el mercado con las denominaciones: TL071-A771-LF351).

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del integrado TL081.*

Diseño del circuito impreso y montaje del mezclador: Para realizar esta operación, sigue las recomendaciones que se dan en la Unidad didáctica 8. Deberás poner especial cuidado a la hora de soldar el circuito integrado a la placa, puesto que un exceso de calor o una inadecuada manipulación podría dañarlo.

Prueba del mezclador: Para probar el mezclador, conectamos a su salida una resistencia de 10 kΩ que hará las funciones de carga. Por la entrada n.º 1 introducimos con un generador de funciones una señal senoidal de 1 kHz de bajo nivel y por la entrada n.º 2 otra señal de idénticas características que la primera. A la salida, se conecta un osciloscopio y se observa el aspecto de la señal de salida. Ahora comprobamos el efecto que se produce en la señal de salida al modificar los potenciómetros R_1 y R_2 correspondientes a la regulación de las señales de entrada uno y dos.

15.4 Mezclador de audio para cinco entradas. Rediseña el circuito del mezclador para que sea capaz de admitir cinco entradas en vez de tres.

15.5 Interruptor crepuscular con AO. En la Unidad didáctica 9 ya se propuso la realización de un interruptor crepuscular. El circuito que ahora se propone es muy similar en su funcionamiento, pero se le añade un amplificador operacional que consigue una mayor sensibilidad para las variaciones obtenidas por el sensor luminoso LDR. En la Figura 15.43 se muestra el esquema del circuito y en la Figura 15.44, el diseño del circuito en circuito impreso.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del transistor BC337 y del operacional 741.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

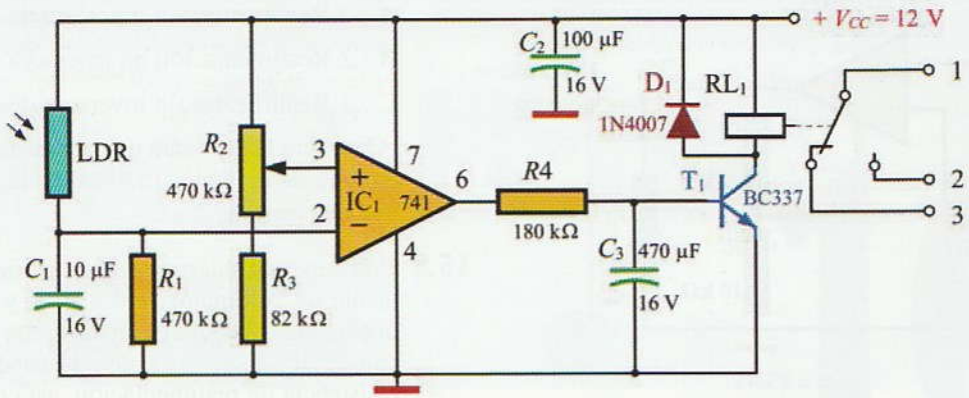
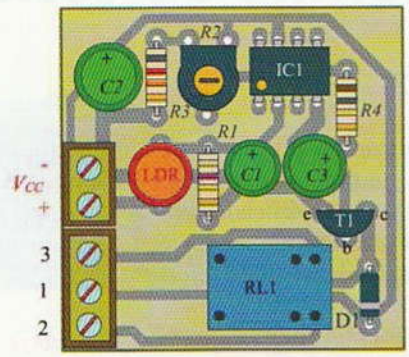
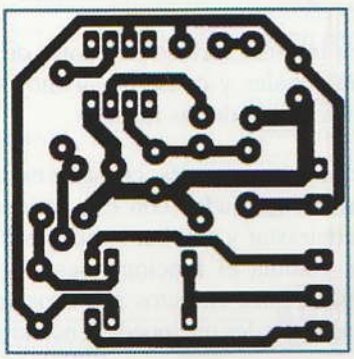


Figura 15.43. Circuito de un interruptor crepuscular con AO.



(a)



(b)

Figura 15.44. Diseño del circuito en circuito impreso. (a) Disposición de componentes. (b) Trazado de pistas de conexión.

AUTOEVALUACIÓN

15.1 La realimentación negativa en los amplificadores consigue:

A ❑ Reducir la distorsión en la frecuencia de la señal.

B ❑ Aumentar el ruido de la señal de salida.

C ❑ Aumentar la ganancia del amplificador.

15.2 Un amplificador operacional posee:

A ❑ Una impedancia de entrada elevada.

B ❑ Una impedancia de salida elevada.

C ❑ Un ancho de banda muy amplio.

15.3 En un amplificador operacional con realimentación inversora de tensión, la ganancia depende:

A ❑ De la tensión de alimentación.

B ❑ De la ganancia a lazo abierto que indican los fabricantes.

C ❑ De la relación entre las resistencias de entrada y de realimentación.

15.4 ¿Cómo se denomina a la tensión que hay que aplicar a la entrada de un amplificador para conseguir una tensión de salida nula en ausencia de señales de entrada?

A ❑ Tensión de offset.

B ❑ Tensión en modo de rechazo común.

C ❑ Tensión diferencial de entrada.

15.5 En la Figura 15.45 se muestra un amplificador operacional realimentado.

a) ¿De qué tipo de realimentación se trata?

A ❑ Realimentación inversora de tensión.

B ❑ Realimentación no inversora de tensión.

C ❑ Realimentación inversora de corriente.

b) ¿Cuál será la ganancia de tensión a lazo cerrado?

c) ¿Qué tensión aparecerá en la salida, si se aplican 10 mV en la entrada?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

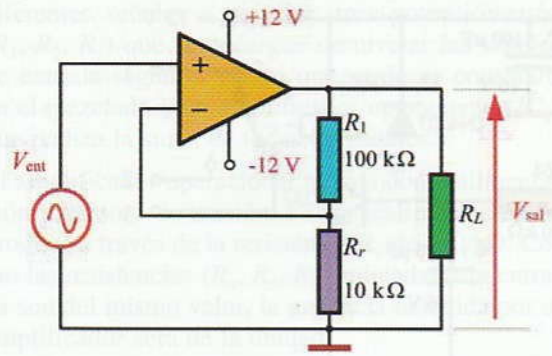


Figura 15.45.

15.6 ¿Qué tipo de realimentación es el que utiliza el amplificador operacional de la Figura 15.46?

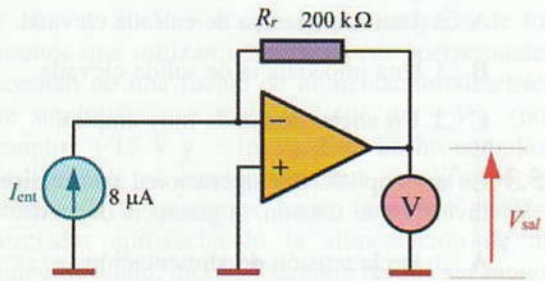


Figura 15.46.

A ❑ Realimentación inversora de tensión.

B ❑ Realimentación no inversora de tensión.

C ❑ Realimentación inversora de corriente.

¿Cuál es la tensión que indicará el voltímetro de la Figura 15.46 conectado a la salida si se aplica a la entrada 8 μA?

15.7 ¿Qué tipo de realimentación utiliza el AO de la Figura 15.47?

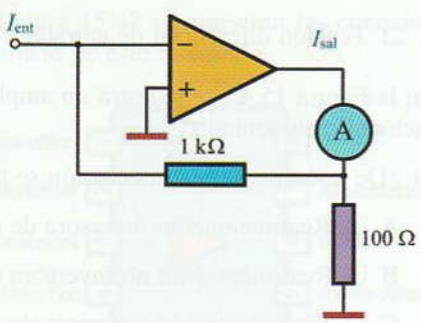


Figura 15.47.

A ❑ Realimentación inversora de tensión.

B ❑ Realimentación no inversora de tensión.

C ❑ Realimentación inversora de corriente.

¿Cuál será la corriente que aparecerá en la salida del circuito de la Figura 15.47, si en la entrada se aplica una corriente de 2 μA?

15.8 Construye un microamperímetro de 0 a 10 μA mediante un voltímetro de 0 a 20 V y un amplificador operacional. Dibuja el circuito con el que se puede conseguir tal objetivo, determinando el valor de la resistencia de realimentación, así como la constante del voltímetro. ¿Qué corriente medirá este dispositivo si el voltímetro indica 5 V?

AMPLIACIÓN

15.1 **Señalización luminosa por aumento de temperatura.** Se trata de conseguir, mediante un resistencia NTC y un amplificador operacional, que una lámpara de señalización se encienda cuando se supere un determinado nivel de temperatura.

*** En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.*

15.2 Busca en Internet varios fabricantes de amplificadores operacionales y consigue sus hojas de especificaciones técnicas de los mismos.

15.3 Como en otras ocasiones, consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, estudia el funcionamiento y la composición de diferentes circuitos prácticos con amplificadores operacionales que puedas encontrar en Internet.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Fuentes de alimentación

Como ya hemos podido comprobar en el estudio de las anteriores unidades didácticas, las fuentes de alimentación son fundamentales para proporcionar las tensiones continuas a las que funcionan todos los circuitos construidos a base de semiconductores, como equipos de amplificación, equipos de recepción de radio y TV, etc. Además, las fuentes de alimentación son equipos imprescindibles para la realización de ensayos en el laboratorio de Electrónica, tales como ensayos de componentes, verificación de circuitos, construcción de prototipos, ajustes, etc.

En la Unidad didáctica 11 se estudió la parte fundamental de una fuente de alimentación: los diodos rectificadores (convierten la C.A. en C.C. pulsante) y los filtros (reducen el rizado excesivo de la C.C. proporcionada por los diodos rectificadores). Para conseguir reducir aún más el rizado de la corriente obtenida por las fuentes de alimentación y, a su vez, conseguir una mayor estabilidad de la tensión, independientemente de las fluctuaciones de la corriente de carga, se hace necesario el uso de circuitos estabilizadores y/o reguladores. Para construir estos circuitos, se utiliza el diodo Zener y el transistor. En la actualidad se fabrican reguladores de tensión integrados que simplifican enormemente esta tarea.

Comenzaremos por el estudio de los circuitos estabilizadores a base de la combinación del diodo Zener y el transistor, para continuar con los sistemas que proporcionan la posibilidad de regular la tensión de salida a voluntad. Posteriormente, se estudiarán los reguladores integrados, que hoy en día han sustituido a los circuitos a base de componentes discretos. Acabaremos con el estudio de las fuentes de alimentación conmutadas, que proporcionan grandes potencias con un buen rendimiento.

Contenido

16.1. **El diodo Zener**
16.2. **Fuentes de alimentación estabilizadas en serie y paralelo**
16.3. **Fuentes estabilizadas de tensión ajustable**
16.4. **Características de una fuente de alimentación**
16.5. **Fuentes de alimentación con reguladores de tensión integrados**
16.6. **Fuentes de alimentación conmutadas**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los diodos Zener y de los reguladores de tensión integrados.
- Analizar el funcionamiento de una fuente de alimentación estabilizada, explicando las características, valores de las magnitudes eléctricas, el tipo y forma de las señales presentes y el tratamiento que sufren dichas señales a lo largo del circuito.
- Seleccionar las características de una fuente de alimentación.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

16.1 El diodo Zener

Para reducir al máximo la tensión de rizado de la salida, y así conseguir una tensión de C.C. lo más constante posible, se utilizan los circuitos estabilizadores (Figura 16.1). Una de las formas de conseguir este tipo de circuitos es con la utilización del diodo Zener.

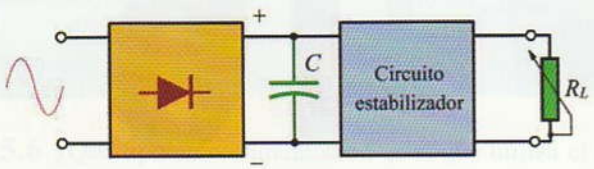


Figura 16.1. **Circuito estabilizador de la tensión.**

16.1.1. Características del diodo Zener

Al estudiar las características de los diodos de unión, pudimos comprobar que, al aplicar una tensión de polarización inversa a un diodo de unión PN, la corriente inversa que fluye por la unión es muy débil (del orden de unos pocos µA o nA) y que, aunque se aumente la tensión inversa aplicada, esta corriente apenas se modifica. Por otro lado, al aumentar gradualmente la tensión inversa, se llega a provocar un aumento brusco de la corriente (efecto de avalancha).

A este efecto de ruptura de la unión se lo conoce con el nombre de **efecto Zener** y a la tensión inversa a la que se produce se le denomina tensión Zener (V_Z). En la Figura 16.2 se pueden apreciar las diferentes partes de la curva característica de un Zener con $V_Z = 8$ V.

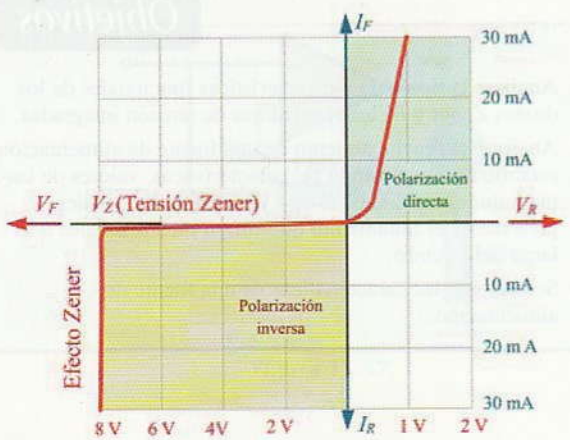


Figura 16.2. **Curva característica del diodo Zener.**

Existe un tipo de diodo fabricado de una forma especial, llamado Zener, que puede trabajar en estas condiciones de funcionamiento sin que la unión se destruya.

En la Figura 16.3 se puede ver el símbolo utilizado para la representación del diodo Zener.

Figura 16.3. **Símbolo del diodo Zener.**

El diodo Zener se comporta como un diodo normal al estar polarizado directamente, y comienza a conducir, aproximadamente, a una tensión de 0,7 V. Hay que indicar que este tipo de funcionamiento en los diodos Zener no es el habitual, ya que están diseñados para trabajar en polarización inversa.

Los diodos Zener se fabrican a base de silicio y en una gama de tensiones Zener escalonadas desde 2 hasta 200 V.

Corriente Zener máxima

La corriente Zener (I_z) que puede soportar un diodo Zener, trabajando en polarización inversa, dependerá de la potencia (P_z) que éste pueda disipar térmicamente. Esta corriente aparece normalmente en las hojas de especificaciones técnicas que facilita el fabricante.

$$I_z = \frac{P_z}{V_z}$$

Actividad resuelta 16.1

La potencia nominal del diodo Zener con la referencia ZPD3 es de 448 mW para una temperatura ambiente de 25° y una tensión Zener de 3,2 V. Averigua cuál será la corriente Zener máxima admisible.

Solución: Aplicando la expresión deducida con anterioridad, tendremos que:

$$I_z = \frac{P_z}{V_z} = \frac{0{,}448}{3{,}2} = 0{,}14 \text{ A}$$

*** Consulta en www.paraninfo.es las hojas de características del diodo Zener ZPD3.*

Resistencia Zener

Si observas atentamente la curva inversa de un diodo Zener, podrás apreciar que no es del todo vertical. Esto indica que, al aumentar la corriente inversa, aparece un pequeño aumento de la tensión. Este fenómeno aparece provocado por una pequeña resistencia dinámica, denominada resistencia Zener (R_z).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

16.1.2. El Zener como regulador de tensión

Una de las aplicaciones más extendidas del diodo Zener es la de estabilizador de tensión para fuentes de alimentación. Eso se consigue aprovechando la propiedad que poseen dichos diodos de conducir con tensiones de polarización inversa, manteniendo la tensión entre sus extremos prácticamente constante, aunque se modifique apreciablemente la intensidad de corriente inversa que fluye por los mismos.

En la Figura 16.4 se muestra el esquema correspondiente a un regulador de tensión conectado a la salida de un puente rectificador. El diodo Zener consigue mantener la tensión en la carga (V_L) a valores constantes, aunque existan variaciones de tensión (V) a la salida del circuito rectificador y aunque se modifique la corriente por la carga (I_L). La resistencia de polarización del Zener (R_S), que se conecta en serie con el circuito de regulación, tiene como misión mantener la tensión de polarización del Zener entre unos valores aceptables, valiéndose para ello de las caídas de tensión que se producen en ella cuando la corriente que la atraviesa tiende a modificarse.

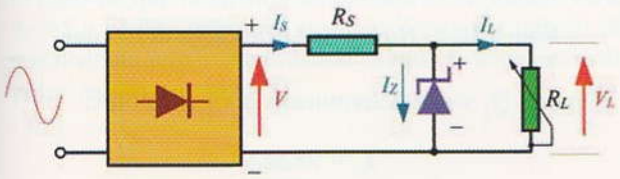


Figura 16.4. Estabilización de tensión mediante diodo Zener.

Los procesos que se dan en este circuito de regulación son los siguientes:

La tensión V_L que aparece en la carga y en el diodo Zener es el resultado de sustraer a la tensión de entrada (V) del regulador la caída de tensión que se produce en la resistencia de polarización (R_s).

En el caso de que la tensión de entrada se eleve, el diodo Zener aumenta su corriente inversa (I_z) para evitar, en todo momento, que la tensión del Zener se modifique.

Esto trae consigo un aumento de corriente por la resistencia R_s y, por tanto, un aumento de la caída de tensión que ésta produce en el circuito. De esta manera se consigue que el aumento de tensión de entrada quede compensado por dicha caída de tensión, manteniéndose la tensión en la carga (V_L) a un valor prácticamente constante.

En el caso de que la tensión de entrada disminuya, los procesos que se dan son similares; la corriente por el diodo tiende a reducirse para mantener así una tensión constante entre sus terminales. Esto provoca una disminución en la corriente por la resistencia R_s y, por tanto, una disminución de la caída de tensión en ella. El resultado es que la tensión en la carga no se reduce debido a esta disminución en la caída de tensión.

Para estudiar con más detalle cómo actúa este circuito, previamente vamos a eliminar la resistencia R_L que representa a la carga.

Cuando se conecta un diodo Zener (polarizado inversamente) en serie con una resistencia R_s se puede conseguir que la tensión que aparece en sus bornes permanezca prácticamente constante (Figura 16.5).

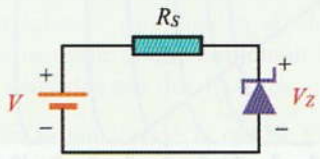


Figura 16.5. El Zener como regulador de tensión.

La resistencia R_s cumple la función de limitadora de corriente. Para que el Zener comience a trabajar en la región de ruptura, hay que aplicar una tensión de fuente V superior a la de ruptura V_z.

La corriente que se establece en el circuito de la Figura 16.5 se calcula de la siguiente forma:

$$I_z = \frac{V - V_z}{R_s}$$

Igual que se hacía para el diodo de unión, aquí también se puede trazar una línea de carga en la correspondiente curva característica de polarización que nos defina el punto de trabajo del diodo Zener para una determinada resistencia R_s y una tensión de fuente.

Así, por ejemplo, vamos a determinar el punto de funcionamiento del diodo Zener BZX85-C3V9 cuando la tensión de la fuente es de 7 V y la resistencia limitadora de 50 Ω (Figura 16.6).

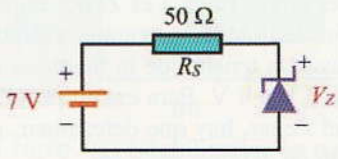


Figura 16.6.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 16.2

En la Figura 16.7 se ha dibujado la curva característica en polarización inversa del Zener en un cuadrante diferente al que le corresponde en realidad. Esto es debido a que en algunas hojas de especificaciones técnicas aparece de esta forma, ya que así es más fácil leer los datos.

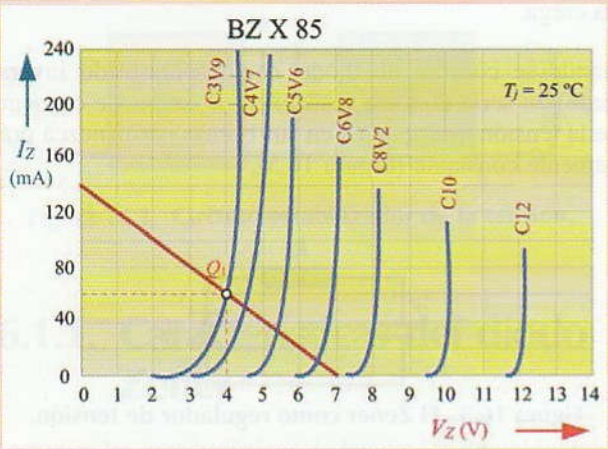


Figura 16.7. Recta de carga del Zener.

Para determinar el punto de trabajo Q_1, es necesario dibujar previamente la recta de carga, para lo cual habrá que calcular los puntos de intersección de dicha recta con los ejes X e Y.

Para $V_z = 0$:

$$I_z = \frac{V - V_z}{R_s} = \frac{7 - 0}{50} = 0{,}14 \text{ A} = 140 \text{ mA}$$

Para $I_z = 0$:

$$0 = \frac{7 - V_z}{50} \Rightarrow V_z = 7 \text{ V}$$

Llevando estos valores a la curva, obtenemos la recta de carga y, en la intersección, el punto de trabajo Q_1. Este punto nos indica que el diodo Zener trabaja con una $I_z = 60$ mA y $V_z = 4$ V, tal como se puede deducir en la Figura 16.7.

Para entender cómo trabaja el Zener en el proceso de estabilización de la tensión, vamos a suponer que, por cualquier causa, la tensión de la fuente se desestabiliza y se eleva de 7 V a 9 V. Para encontrar el nuevo punto de trabajo del Zener, hay que determinar, previamente, la nueva recta de carga.

Para $V_z = 0$:

$$I_z = \frac{V - V_z}{R_s} = \frac{9 - 0}{50} = 0{,}180 \text{ A} = 180 \text{ mA}$$

Para $I_z = 0$:

$$0 = \frac{9 - V_z}{50} \Rightarrow V_z = 9 \text{ V}$$

En la Figura 16.8 se muestra la nueva línea de carga.

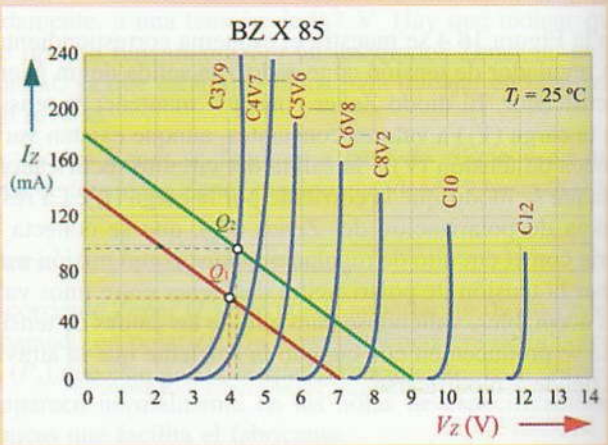


Figura 16.8. Nueva línea de carga del Zener.

El punto Q_2 viene determinado por los valores:

$$I_z = 98 \text{ mA}$$

$$V_z = 4{,}2 \text{ V}$$

Se puede apreciar claramente cómo se realiza el proceso de estabilización de la tensión y cómo ésta se mantiene prácticamente constante gracias a la variación de la corriente provocada por el Zener (la tensión en el diodo Zener sólo se incrementa de 4 a 4,2 V a pesar de que la tensión de la fuente aumenta de 7 a 9 V; por supuesto, esto se consigue a costa del aumento experimentado de 60 a 98 mA en la corriente por el Zener).

La pequeña variación que se produce en la tensión Zener es debida a que la curva característica está ligeramente inclinada o, lo que es lo mismo, que la resistencia Zener R_z ejerce su influencia.

Habrás podido observar que, para conseguir una mayor estabilidad de la tensión, conviene trabajar en las zonas menos pendientes de la curva característica, evitando siempre el codo de la misma.

La pequeña variación de tensión ΔV_z que produce un diodo Zener se puede calcular multiplicando la varia-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

ción de corriente ocasionada ΔI_z por la resistencia del Zener R_z:

$$\Delta V_z = \Delta I_z \cdot R_z$$

*** Consulta en www.paraninfo.es las hojas de características del diodo Zener BZX85-C3V9.*

16.1.3. El diodo Zener ideal

Debido a que R_z es de muy pequeño valor y a que, por este hecho, las variaciones de tensión de Zener V_z, al variar I_z, son muy pequeñas, se puede suponer, sin equivocarse mucho, que la tensión V_z permanece siempre constante. Por supuesto, esto se cumplirá siempre que el Zener trabaje con tensiones y corrientes de polarización inversa que estén en torno a los valores nominales.

Actividad resuelta 16.3

El regulador, mostrado en la Figura 16.9, consta de un diodo Zener BZX85-C33, que según las hojas de especificaciones técnicas posee una tensión Zener V_z de 33 V y una corriente máxima admisible de 33 mA. En el caso de que la tensión de entrada al regulador varíe de 45 a 55 V, ¿trabajará el diodo Zener por debajo de su corriente máxima admisible cuando la resistencia de polarización sea 1.000 Ω?

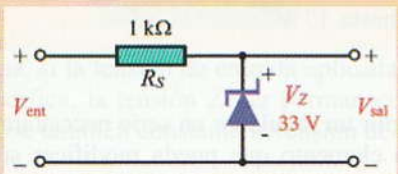


Figura 16.9.

Solución: Utilizando la aproximación del diodo ideal, tenemos que V_z va a permanecer con un valor constante de 33 V.

La corriente mínima por el Zener se dará para la tensión de entrada más baja de 45 V.

$$I_{z(\text{mín})} = \frac{V - V_z}{R_s} = \frac{45 - 33}{1.000} = 0{,}012 \text{ A} = 12 \text{ mA}$$

Y la corriente máxima para la tensión de entrada más elevada de 55 V:

$$I_{z(\text{máx})} = \frac{55 - 33}{1.000} = 0{,}022 \text{ A} = 22 \text{ mA}$$

Se puede comprobar que los márgenes de corriente en los que trabaja el Zener son menores a la corriente máxima admisible de 33 mA.

*** Consulta en www.paraninfo.es las hojas de características del diodo Zener BZX85-C33.*

16.2 Fuentes de alimentación estabilizadas en serie y paralelo

La necesidad de las fuentes de alimentación estabilizadas se debe a que la tensión de salida de una fuente de alimentación sufre variaciones, que pueden afectar al buen funcionamiento del receptor al que alimentan. Estas variaciones pueden ser causadas por dos factores:

- Variaciones en la tensión de la red de C.A. que producen, a su vez, variaciones del mismo carácter en la tensión de salida.
- Debido a que la fuente de alimentación posee una determinada resistencia interna, la corriente de carga produce una caída de tensión en ella, con lo que se producen variaciones en la tensión de salida al variar la demanda de energía de la carga.

La función que poseen los circuitos estabilizadores es la de mantener constante la tensión de salida de la fuente de alimentación, aunque varíe la corriente de carga o la tensión de la red. Para conseguirlo y en función de cómo se conecten entre la fuente y la carga, existen dos tipos de circuitos estabilizadores (también llamados reguladores): los estabilizadores en paralelo [Figura 16.10(a)] y los estabilizadores en serie [Figura 16.10(b)].

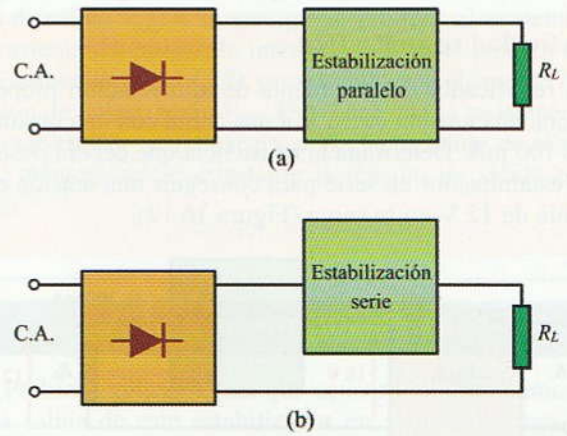


Figura 16.10. (a) Estabilizador en paralelo. (b) Estabilizador en serie.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

16.2.1. Estabilizadores en paralelo

Un ejemplo de estabilizadores en paralelo es el que hemos realizado con el diodo Zener como regulador de tensión. En la Figura 16.11 se observa un circuito de este tipo. El diodo Zener, conectado en paralelo con la carga, consigue mantener la tensión Zener (V_z) en dicha carga a costa de desviar parte de la corriente por sí mismo cuando la tensión se eleva por encima de V_z.

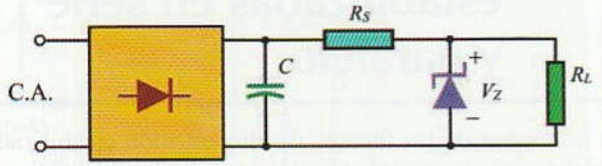


Figura 16.11. Estabilizador en paralelo con Zener.

Este tipo de regulador es muy poco utilizado, ya que se necesitan diodos Zener capaces de soportar grandes corrientes; además, la impedancia de salida que se obtiene con este tipo de regulador es algo elevada.

16.2.2. Estabilizadores en serie

En los estabilizadores en serie el circuito de estabilización se coloca en serie con la carga. Este circuito variará su resistencia interna en función de la tensión que se presente en la carga, de tal forma que, si la tensión tiende a reducirse, dicha resistencia interna disminuye con el fin de que la caída de tensión que en ella se produce disminuya, compensando la reducción inicial; al contrario, si la tensión en la carga tiende a elevarse, se produce un aumento de resistencia interna del estabilizador, y con ella un aumento de la caída de tensión en la misma que da como resultado una compensación del aumento inicial.

Actividad resuelta 16.4

El rectificador de una fuente de alimentación proporciona una tensión de 16 V a una carga con un consumo de 100 mA. Determina la resistencia que deberá poseer el estabilizador en serie para conseguir una tensión estable de 12 V en la carga (Figura 16.12).

Figura 16.12.

Solución: En cualquier caso, se cumplirá siempre que la tensión en la carga sea igual a la proporcionada por el rectificador menos la caída de tensión que se produzca en la resistencia interna del estabilizador:

$$V_L = V - r_i \cdot I_L$$

En este caso la resistencia interna del estabilizador debe absorber 4 V para mantener la tensión en la carga a 12 V (12 V = 16 V − 4 V). Luego la resistencia interna se calcula aplicando la ley de Ohm:

$$r_i = \frac{4\ \text{V}}{0{,}1\ \text{A}} = 40\ \Omega$$

¿Qué valor deberá tomar la resistencia interna del estabilizador, si la carga aumenta su demanda de corriente hasta 150 mA?

Solución: Como es lógico, para que se mantenga la tensión en la carga, la caída de tensión producida en el estabilizador debe mantenerse en los 4 V. Para que esto ocurra, la resistencia interna del estabilizador deberá disminuir hasta:

$$r_i = \frac{4\ \text{V}}{0{,}15\ \text{A}} = 26{,}7\ \Omega$$

¿Y si la intensidad de carga disminuye hasta 10 mA?

¿De qué valor tendrá que ser r_i, si para una corriente de carga de 100 mA la tensión de entrada del estabilizador aumenta hasta 17 V?

Para conseguir un regulador en serie necesitaremos, por un lado, de un elemento que pueda modificar su resistencia interna (dispositivo de control) y de un elemento sensible a los cambios de tensión (tensión de referencia), tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 16.13.

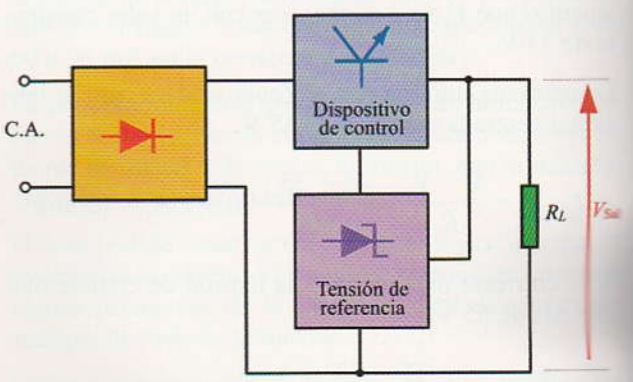


Figura 16.13. Diagrama de bloques de un estabilizador en serie.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Uno de los componentes que puede modificar su resistencia interna es el transistor. Mediante un elemento detector de los cambios de tensión, como un diodo Zener y un transistor, es posible construir un modelo sencillo de regulador en serie como el que se muestra en la Figura 16.14.

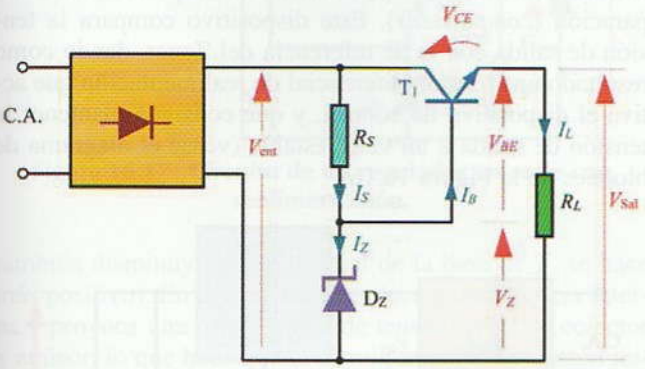


Figura 16.14. Regulador en serie simple.

El transistor T_1 está dispuesto en configuración colector común, lo que nos indica que es un seguidor de emisor. Según se puede apreciar en la Figura 16.14, la tensión de entrada del transistor, que se corresponde con la tensión del Zener, se aplica directamente a la base del transistor y la tensión de salida aparece en el emisor. La tensión de salida de este estabilizador es siempre algo inferior a la de entrada del Zener, tal como se deduce de la siguiente relación:

$$V_{sal} = V_z - V_{BE}$$

De esta forma, si la tensión de entrada aplicada al estabilizador se modifica, la tensión Zener permanece constante, manteniéndose también constante la tensión de salida en la carga.

Hay que tener en cuenta que la tensión base-emisor del transistor es: $V_{BE} = V_z - V_{sal}$, por lo que si, por ejemplo, la tensión de salida tiende a disminuir por un aumento de la corriente en la carga, como la tensión V_z de referencia se mantiene al mismo valor, la tensión base-emisor tiende a aumentar; lo que provoca un aumento en la conducción del transistor y, por tanto, una disminución de la caída de tensión entre colector y emisor que compensa la disminución inicial de V_{sal}.

El efecto de estabilización de la tensión se consigue gracias a la variación que se produce en la resistencia colector-emisor del transistor. Observa que dicha resistencia se encuentra en serie con la carga y que produce una caída de tensión V_{CE} que se resta a la tensión de entrada del estabilizador:

$$V_{sal} = V_{ent} - V_{CE}$$

El diodo Zener está conectado en serie con la resistencia R_s. El valor óhmico de esta resistencia debe ser el adecuado para que el Zener trabaje siempre en la zona de ruptura dentro de unos límites de tensión preestablecidos.

Para entender mejor cómo funciona este circuito de estabilización en serie, supongamos que la tensión de entrada V_{ent} tiende a aumentar. En este caso, el diodo Zener tenderá a mantener la tensión V_z a costa de producir un aumento de la corriente I_z que fluye por sí mismo. Este aumento de I_z se traduce en un aumento de corriente por la resistencia limitadora R_s y, por consiguiente, en un aumento de la caída de tensión entre sus terminales. Como esta resistencia está conectada entre los terminales de colector y base, al aumentar dicha caída de tensión se produce un aumento de la polarización negativa colector-base, que trae como consecuencia un aumento de la resistencia colector-emisor. En definitiva, la tensión V_{CE} se hace mayor y el aumento de tensión de entrada inicial queda compensado, manteniéndose estable la tensión de salida.

Actividad propuesta 16.1

¿Podrías explicar cómo se produciría el efecto de estabilización en el caso de que la tensión de entrada tendiese a disminuir?

Otro de los fenómenos de inestabilidad que se puede dar en la fuente de alimentación es que la carga sea variable. Supongamos que la corriente de carga I_L tiende a aumentar por una disminución de R_L. Como la corriente de emisor I_E es la misma que la de la carga, también aumenta, provocando una elevación de la caída de tensión V_{CE} entre colector y emisor, que trae consigo una disminución de la tensión de salida V_{sal}. A la vez que se produce el aumento de la corriente de emisor, la intensidad de base también tiende a aumentar ($I_B = I_E/\beta$), provocando una elevación de la tensión de polarización V_{BE}. Esto hace que la resistencia de colector-emisor se reduzca y con ella la caída de tensión V_{CE}, manteniéndose constante la tensión de salida en la carga.

Actividad propuesta 16.2

¿Podrías explicar ahora qué ocurriría si conectamos a la salida de este estabilizador en serie una carga de muy pequeño consumo?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad resuelta 16.5

El puente rectificador de una fuente de alimentación proporciona una tensión continua de 14 V al estabilizador en serie de la Figura 16.15. Para conseguir una tensión estable en la salida, se conecta un diodo Zener de 8,2 V con una resistencia limitadora de 100 Ω. Si el transistor posee una ganancia $\beta = 80$, determina la tensión y corriente para una carga de 75 Ω, la corriente por el Zener, así como la potencia que disipa el transistor.

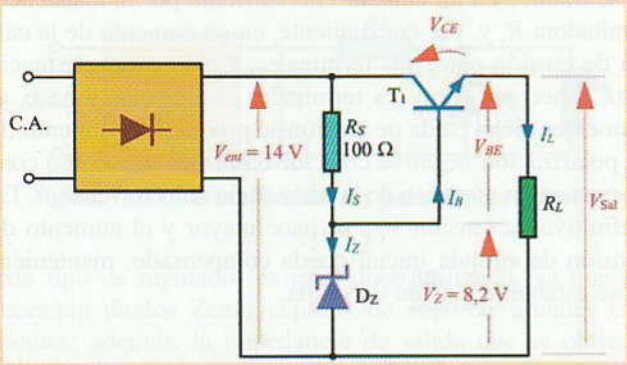


Figura 16.15.

Solución: La tensión en la carga será igual a:

$$V_{sal} = V_z - V_{BE} = 8{,}2 - 0{,}7 = 7{,}5 \text{ V}$$

La corriente por la carga la calculamos con la ley de Ohm:

$$I_L = \frac{V_{sal}}{R_L} = \frac{7{,}5}{75} = 0{,}1 \text{ A} = 100 \text{ mA}$$

La corriente por el Zener la calculamos aplicando la 1.ª ley de Kirchhoff:

$$I_z = I_s - I_B$$

La corriente por la resistencia limitadora es igual a:

$$I_s = \frac{V_{ent} - V_z}{R_s} = \frac{14 - 8{,}2}{100} = 0{,}058 \text{ A} = 58 \text{ mA}$$

La corriente por la base la determinamos a partir de la ganancia del transistor:

$$\text{Como } I_E = I_L \quad , \quad I_B = \frac{I_E}{\beta} = \frac{100}{80} = 1{,}25 \text{ mA}$$

$$I_z = 58 - 1{,}25 = 56{,}75 \text{ mA}$$

La potencia de disipación del transistor será igual a:

$$P = V_{CE} \cdot I_E = (V_{ent} - V_{sal}) \cdot I_E =$$
$$= (14 - 7{,}5) \cdot 0{,}1 = 0{,}65 \text{ W}$$

16.2.3. Estabilizador en serie con realimentación

Este tipo de estabilizador mejora las características del estudiado con anterioridad, al añadir un dispositivo de comparación (*comparador*). Este dispositivo compara la tensión de salida con la de referencia del Zener, dando como resultado una tensión diferencial de realimentación que activa el dispositivo de control, y que consigue mantener la tensión de salida a un valor estable (véase el diagrama de bloques de la Figura 16.16).

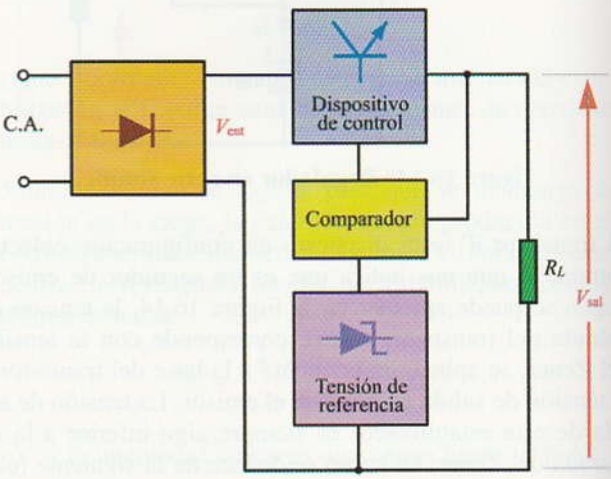


Figura 16.16. Diagrama de bloques de un regulador en serie con realimentación.

En la Figura 16.17 se muestra el esquema eléctrico de este circuito. Básicamente, el comparador consiste en un transistor T_2 que toma una parte proporcional de la tensión de salida (V_{real}), proporcionada por un divisor de tensión resistivo ($R_2 - R_3$), y la compara con la tensión (V_z) de referencia de un diodo Zener. El resultado de esta comparación es una tensión diferencial que se corresponde con la tensión base-emisor del transistor; es decir:

$$V_{BE} = V_{real} - V_z$$

Esta tensión diferencial es la que produce los cambios de polarización en el transistor de control T_1, que al variar su resistencia interna proporciona la estabilización deseada.

Para entender cómo funciona este circuito, supongamos que la tensión de salida tiende a disminuir. En consecuencia la tensión de realimentación también disminuirá y, con ella, la tensión V_{BE} de polarización de T_2. Esto trae consigo una disminución en la conducción de T_2, por lo que la polarización de la base del transistor T_1 se hace más positiva (si disminuye la corriente del colector T_2 que fluye, en parte, a través de R_1, observa cómo la caída de tensión en ella

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

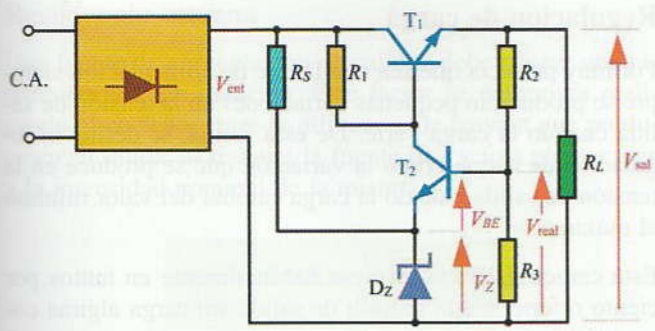


Figura 16.17. Circuito de un regulador en serie con realimentación.

también disminuye y el potencial de la base de T_1 se hace más positivo). En definitiva, T_1 reduce su resistencia interna y provoca una menor caída de tensión entre su colector y emisor, lo que hace que la disminución de la tensión inicial quede compensada.

Actividad propuesta 16.3

¿Podrías explicar cómo se produciría el efecto de estabilización en el caso de que la tensión en la carga tendiese a aumentar?

Tensión de salida

La tensión de salida de este circuito de estabilización depende fundamentalmente de la tensión de realimentación V_{real} que se aplica al conjunto formado por T_2 y D_z. Esta tensión de realimentación se toma de la resistencia R_3 y depende de la corriente I' que fluye por el divisor de tensión formado por R_2 y R_3:

$$V_{real} = R_3 \cdot I'$$

Como $I' = \dfrac{V_{sal}}{R_2 + R_3}$ $\quad V_{real} = \dfrac{R_3}{R_2 + R_3} V_{sal}$

Por otro lado, tenemos que la tensión de realimentación es igual a la suma de la tensión del Zener más la tensión base emisor de T_2:

$$V_{real} = V_z + V_{BE}$$

Sustituyendo el valor V_{real} en esta ecuación tenemos:

$$\frac{R_3}{R_2 + R_3} V_{sal} = V_z + V_{BE}$$

$$V_{sal} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} (V_z + V_{BE})$$

En esta última ecuación, podemos comprobar cómo la tensión de salida del estabilizador en serie con realimentación depende fundamentalmente de los valores de la red de realimentación formada por R_2 y R_3. Esto nos permite utilizar diodos Zener de pequeña tensión respecto a la tensión de salida, con los beneficios que ello conlleva.

Actividad resuelta 16.6

Determina la tensión de salida del estabilizador de la Figura 16.17, si $R_2 = 1{,}3$ kΩ, $R_3 = 2{,}4$ kΩ, $V_z = 5$ V.

Solución: $V_{sal} = \dfrac{1.300 + 2.400}{2.400} (5 + 0{,}7) = 8{,}79$ V

16.2.4. Estabilizador con amplificador operacional

En el circuito de estabilización de la Figura 16.18 se ha empleado un amplificador operacional, en vez de un transistor, como elemento comparador. La tensión de realimentación se aplica a la entrada inversora y la de referencia del Zener a la no-inversora. En la salida del amplificador operacional se obtiene una tensión diferencial que activa al transistor de control.

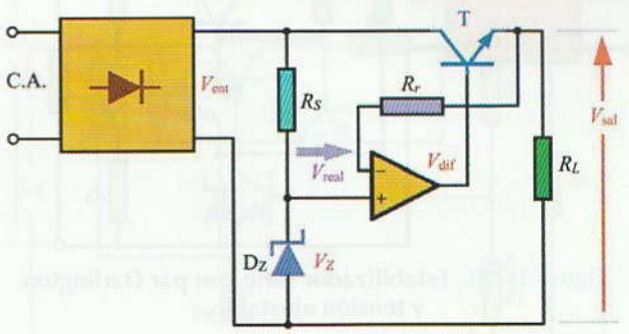


Figura 16.18. Estabilizador serie con AO.

16.3 Fuentes estabilizadas de tensión ajustable

Para determinadas aplicaciones, las fuentes de alimentación deben facilitar la posibilidad de proporcionar tensiones de salida de diferentes valores. Esto se consigue con facilidad, incluyendo una resistencia variable en el circuito que sea capaz de modificar el valor de la tensión de realimentación de la salida. En la Figura 16.19 se muestra el circuito de un estabilizador en serie con tensión ajustable.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

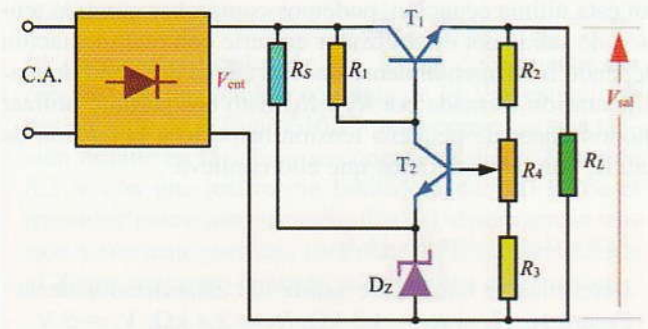


Figura 16.19. Estabilizador en serie con tensión ajustable.

En el circuito de la Figura 16.19, se ha incluido el potenciómetro R_4 al divisor de tensión formado por R_2 y R_3. Según donde situemos el cursor del potenciómetro, podemos modificar la tensión de realimentación aplicada a la base de T_1, con lo que se consigue así ajustar la tensión en la carga a nuestra voluntad.

En la práctica es corriente utilizar como transistor de control un par Darlington (transistores T_1 y T_2), con lo que se consigue así aumentar la corriente máxima en la carga (Figura 16.20).

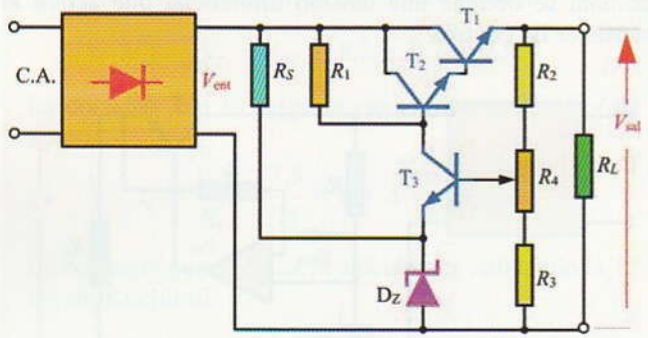


Figura 16.20. Estabilizador serie con par Darlington y tensión ajustable.

16.4 Características de una fuente de alimentación

Entre las muchas características que se pueden observar en una fuente de alimentación como, por ejemplo, corriente y tensión de salida, rizado, frecuencia y tensión de red, temperatura de funcionamiento, regulación de carga, regulación de línea, resistencia interna, limitación de corriente, etc., estudiaremos las que son de vital importancia para definir la calidad de la estabilidad de dicha fuente.

Regulación de carga

Por muy perfecta que sea una fuente de alimentación siempre se producirán pequeñas variaciones en la tensión de salida cuando la carga varíe. De esta forma, se define la regulación de carga, como la variación que se produce en la tensión de salida cuando la carga cambia del valor mínimo al máximo.

Esta característica se expresa habitualmente en tantos por ciento referidos a la tensión de salida sin carga alguna conectada.

$$\text{Regulación en la carga} = \frac{V_{\text{sin carga}} - V_{\text{carga máxima}}}{V_{\text{sin carga}}} \cdot 100$$

Actividad resuelta 16.7

La tensión de salida sin carga de una fuente de alimentación es de 24 V. Calcula la regulación en la carga, si la tensión a plena carga es de 23,95 V.

Solución:

$$\text{Regulación en la carga} = \frac{24 - 23{,}95}{24} \cdot 100 = 0{,}2\%$$

Regulación de línea

Esta característica nos indica el grado de estabilidad de la tensión de salida de una fuente de alimentación frente a las variaciones de la tensión de la red de alimentación de C.A.

Las variaciones de la tensión de línea se expresan en tantos por ciento referidos a la tensión nominal de salida de la fuente de alimentación.

$$\text{Regulación de línea} = \frac{V_{\text{sal máx}} - V_{\text{sal mín}}}{V_{\text{nominal}}} \cdot 100$$

Actividad resuelta 16.8

La tensión nominal de salida de una fuente de alimentación es de 24 V. Al variar la tensión de red entre 215 V y 225 V, se detecta un cambio de tensión en la carga de 23,99 V a 24,01 V. Determina la regulación de línea.

Solución:

$$\text{Regulación de línea} = \frac{24{,}01 - 23{,}99}{24} \cdot 100 = 0{,}083\%$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Resistencia interna

Una fuente de alimentación de calidad debe poseer una resistencia interna reducida. Este factor se determina realizando el cociente entre la diferencia de tensión que produce en su salida, al trabajar la fuente de vacío a plena carga y la intensidad nominal de la misma.

$$R_i = \frac{V_{\text{sin carga}} - V_{\text{carga máxima}}}{I_n}$$

Actividad resuelta 16.9

Determina la resistencia interna de la fuente de alimentación de la Actividad resuelta 16.9 si su intensidad nominal es de 1 A.

Solución: $R_i = \dfrac{24 - 23{,}95}{1} = 0{,}05\ \Omega$

Una fuente de tensión real puede simplificarse en un circuito equivalente como una fuente de tensión ideal en serie con su resistencia interna, tal como se muestra en la Figura 16.21.

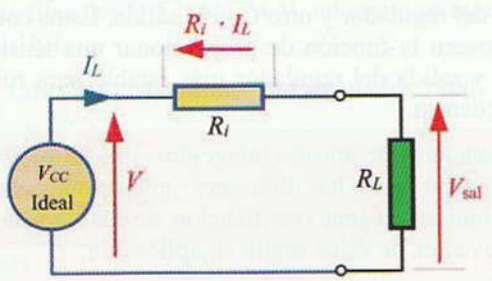


Figura 16.21. Circuito equivalente de una fuente de tensión real.

La fuente de tensión ideal suministra una tensión constante en su salida independientemente de la corriente de la carga.

En una fuente de tensión real, su resistencia interna R_i provoca una pequeña caída de tensión dependiente de la corriente de carga I_L, lo que produce una dependencia de la tensión de salida V_{sal} respecto a dicha corriente.

$$V_{sal} = V - R_i I_L$$

Tensión de rizado

Es la componente de C.A. de la tensión de salida. Este valor característico debe ser lo más pequeño posible para una fuente de alimentación de calidad. En las características típicas de una fuente de alimentación se suele expresar el nivel máximo de la tensión de rizado en valores eficaces o pico a pico. Así, por ejemplo, un valor habitual de ésta suele ser 1 mV eficaz.

Limitación de corriente

Para evitar daños a los circuitos que componen una fuente de alimentación, los fusibles no presentan una protección segura en los casos de cortocircuito accidental y sobrecargas. Estos dispositivos actúan con excesiva lentitud ante las sobrecorrientes, con lo que se producen daños irreversibles en los semiconductores de potencia, si no se actúa con rapidez. Por esta razón, las fuentes de alimentación suelen ir equipadas con circuitos electrónicos que, al detectar una sobrecorriente, reducen la tensión de salida, evitando que la corriente de carga supere valores peligrosos.

Algunas fuentes de alimentación, como las de laboratorio, poseen la posibilidad de ajustar, mediante un potenciómetro, el valor de la corriente máxima que la fuente entrega a la carga.

En la Figura 16.22 se muestra el circuito básico para la limitación de la corriente, formado por el transistor T_2 y la resistencia R_5.

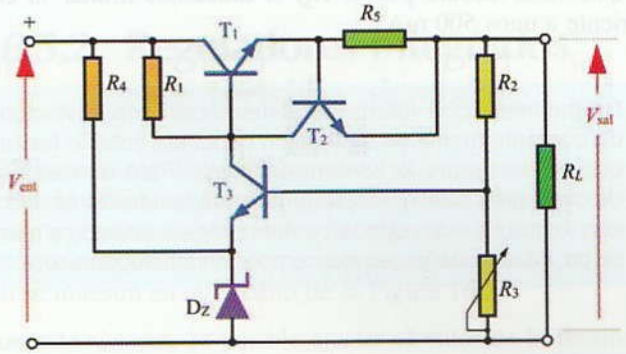


Figura 16.22. Circuito básico de limitación de corriente en un regulador.

La resistencia R_5 se conecta en serie con la carga, lo que genera una caída de tensión proporcional a la corriente de carga ($R_5 I_L$). Se puede decir que esta resistencia actúa como detector de corriente.

Los terminales de R_5 se conectan a la base y emisor del transistor T_2. El valor de R_5 debe ser tal que, para corrientes inferiores a la nominal, la caída de tensión que se produce en ella sea inferior a la tensión de polarización de T_2,

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

es decir, unos 0,6 V, con lo que se consigue que T_2 permanezca en corte. Para corrientes superiores a la nominal, la caída de tensión R_5 es suficiente para polarizar el transistor T_2 y hacerlo conducir. Dado que el colector de este transistor está conectado directamente a la base del transistor de control T_1 y a la resistencia R_1, cuando T_2 conduce aumenta la corriente por dicha resistencia, con lo que se reduce la tensión de base de T_1. Esto provoca una disminución de la tensión de salida de la fuente de alimentación en el grado preciso para evitar el aumento de la corriente de carga.

Dependiendo del valor que se asigne a la resistencia R_5, se puede fijar el valor de la corriente máxima por la carga. La caída de tensión que se produce en esta resistencia no deberá superar la tensión de 0,6 a 0,7 V de base emisor del transistor T_2 si deseamos que éste no actúe. De esta forma, la corriente máxima que proporcionará el limitador de corriente será:

$$\text{Como} \quad V_{BE} = R_5 I_{L\,máx} \quad \Rightarrow \quad I_{L\,máx} = \frac{V_{BE}}{R_5}$$

Así, por ejemplo, si R_5 es igual a 0,5 Ω, tomando una tensión de base emisor de 0,65 V, la corriente máxima tendrá un valor de:

$$I_{L\,máx} = \frac{0{,}65}{0{,}5} = 1{,}3 \text{ A}$$

¿Qué valor deberá poseer R_5, si deseamos limitar la corriente a unos 500 mA?

En resumen, una fuente de alimentación con limitación de corriente mantiene su tensión de salida estable hasta que no se supere la corriente máxima. Para demandas de corrientes superiores, la tensión de salida disminuye, con lo que se evita que la corriente siga creciendo y que se produzcan daños en los componentes electrónicos.

16.5 Fuentes de alimentación con reguladores de tensión integrados

Debido al gran avance de las nuevas tecnologías en la integración de circuitos, hoy en día se fabrican una gran variedad de reguladores de tensión en forma de circuito integrado de tan sólo tres terminales. Estos circuitos, que permiten integrar una gran cantidad de componentes discretos en una única cápsula (CI), hacen más fácil el trabajo del proyectista y abaratan considerablemente el producto final.

En la Figura 16.23 se muestra el circuito de una fuente de alimentación estabilizada mediante un regulador integrado.

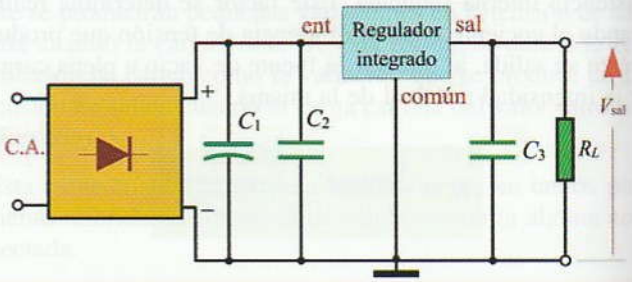


Figura 16.23. Fuente de alimentación con regulador integrado.

El regulador integrado consta de tres terminales: uno se corresponde con el de entrada de la tensión sin estabilizar y otro con el de salida de tensión estabilizada. El tercero se corresponde con el terminal común a la entrada y salida que, por lo general, se conecta a masa.

Esta fuente de alimentación es muy sencilla, ya que, aparte de los componentes habituales (transformador, diodos rectificadores y condensador C_1 de alta capacidad, que hace las funciones de filtro), se compone del CI del regulador al que se le añaden un condensador C_2 de baja capacidad a la entrada del regulador y otro C_3 a la salida. Estos condensadores poseen la función de proporcionar una tensión a la entrada y salida del regulador más estable para ruidos de alta frecuencia.

Los reguladores de tensión integrados ofrecen muy buenas características para las diferentes aplicaciones. Seguidamente, indicamos una clasificación de las características más relevantes de éstos según su aplicación:

a) Según su polaridad:
- Salida positiva (negativo a masa).
- Salida negativa (positivo a masa).

b) Según la corriente que pueden controlar:
- De potencia.
- De señal.

c) Según la amplitud de la tensión de salida:
- Tensión de salida fija.
- Tensión de salida ajustable.

d) Según sus protecciones:
- Con limitación de corriente.
- Sin limitación de corriente.
- Con limitación ajustable de corriente.

En las hojas de especificaciones técnicas que proporcionan los fabricantes de reguladores integrados (Data Book) se

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

pueden encontrar las características más significativas de éstos, como son:

- Corriente máxima de salida.
- Tensión de regulación.
- Protecciones internas (al cortocircuito, sobrecargas, sobrecalentamientos, etc.).
- Tipo de encapsulado.
- Temperaturas de trabajo, temperatura máxima de la unión.
- Tensión de entrada máxima y mínima.
- Tensión de salida máxima, nominal y mínima.
- Tensión de rizado en la salida.

En el mercado existen una gran variedad de reguladores de tensión integrados. Seguidamente, vamos a estudiar, a modo de ejemplo, las características de alguno de los reguladores más representativos.

16.5.1. La serie de reguladores 7800

Dentro de esta serie, existe una variedad que proporciona tensiones fijas desde 5 hasta 24 V, tal como se muestra en la Tabla 16.1.

Tabla 16.1. Tensiones del regulador 7800.

Regulador integrado	Tensión nominal de salida	Tensión de entrada mínima (V)	Tensión de entrada máxima (V)
7805	+5 V	7	25
7806	+6 V	8	25
7808	+8 V	10,5	25
7885	+8,5 V	10,5	25
7812	+12 V	14,5	30
7815	+15 V	17,5	30
7818	+18 V	21	30
7824	+24 V	27	38

- Corriente de salida máxima: 1,5 A.
- Potencia máxima de disipación: 15 W.
- Temperaturas de trabajo: 0 °C-150 °C.
- Polaridad positiva (negativo a masa).
- Limitación de corriente de cortocircuito.
- Protección contra sobrecarga térmica.

Se fabrican en dos tipos de encapsulado:

- En metal, con la cápsula tipo TO-3 [Figura 16.24(b)].
- En plástico, con la cápsula tipo TO-220AB [Figura 16.24(a)].

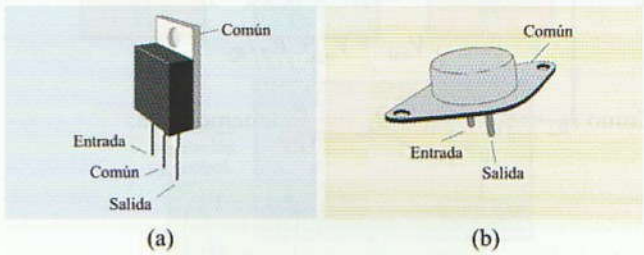


Figura 16.24. Encapsulados de reguladores integrados. (a) TO-220AB. (b) TO-3.

Con el encapsulado metálico se consigue mayor potencia de trabajo que con el de plástico, con lo que se pueden aumentar considerablemente estas potencias incorporando aletas de refrigeración.

La serie de reguladores de tensión 7900 posee polaridad negativa y las mismas características eléctricas que la serie 7800.

*** Consulta en www.paraninfo.es las hojas de características de la serie de reguladores LM7800 y LM7900.*

16.5.2. Reguladores integrados con tensión ajustable

Mediante un regulador integrado corriente es posible obtener en la salida una tensión ajustable a la salida. Para ello, se incluye entre los terminales de salida y común del regulador una resistencia fija R_1 y un potenciómetro R_2, tal como se muestra en el circuito de la Figura 16.25.

Con este sistema, es posible ajustar el valor de la tensión de salida por encima de la tensión nominal del regulador. Estudiaremos detenidamente cómo se consigue esto.

En el circuito de la Figura 16.25 se ha tomado el regulador integrado LM7805, lo que implica que su tensión nominal de regulación es $V_n = 5$ V. Se trata de averiguar cuál será la tensión máxima que se puede obtener en la salida al ajustar el potenciómetro R_2 a su valor máximo.

El terminal común del regulador no se ha conectado a masa, sino a la resistencia R_2. Por otro lado, la tensión nominal del regulador V_n aparecerá de forma casi invariable entre el terminal común y el de salida, por lo que esta tensión queda aplicada entre los extremos de la resistencia R_1. Todos los reguladores integrados derivan por su terminal

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

común una pequeña corriente, conocida por el nombre de *corriente de reposo* I_Q. Esta corriente suele ser muy pequeña (casi nunca supera los 8 mA) y permanece prácticamente constante para las diferentes condiciones de trabajo. Así, tenemos que la tensión de salida del regulador será igual a la suma de la tensión en R_1 y R_2:

$$V_{sal} = V_n + R_2 I_{R2}$$

Como $I_{R2} = I_Q + I_{R1} = I_Q + \frac{V_n}{R_1}$, tenemos que:

$$V_{sal} = V_n + R_2\left(I_Q + \frac{V_n}{R_1}\right)$$

Donde queda clara la dependencia que posee la tensión de salida con las resistencias R_1 y R_2.

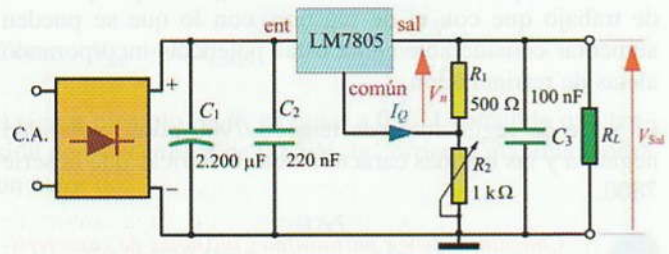


Figura 16.25. Fuente de alimentación con regulador de tensión ajustable.

Actividad resuelta 16.10

En nuestro ejemplo de la Figura 16.25, tomando 8 mA como corriente de reposo, obtendremos una tensión máxima igual a:

$$V_{sal} = 5 + 1.000\left(0{,}008 + \frac{5}{500}\right) = 23 \text{ V}$$

¿A qué valor habrá que ajustar el potenciómetro R_2 para conseguir una tensión de salida de 10 V?

16.5.3. Fuente de corriente con regulador integrado

Conectando una resistencia R_1 en serie con la carga y conectando el terminal común del regulador integrado entre esta resistencia y la carga, se puede conseguir que la corriente que entregue el regulador a la carga sea fija, independientemente del valor óhmico que tome la resistencia de carga R_L. En la Figura 16.26 se muestra el circuito de este tipo.

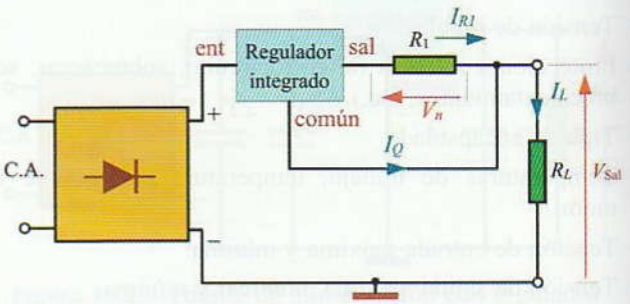


Figura 16.26. Fuente de corriente con regulador integrado.

En este circuito, se cumple que la intensidad I_L por la carga es igual a la suma de la corriente de reposo I_Q más la que fluye por la resistencia limitadora R_1. Como la tensión de regulación queda aplicada en dicha resistencia, se cumple que:

$$I_L = I_Q + I_{R1} = I_Q + \frac{V_n}{R_1}$$

Actividad resuelta 16.11

Así, por ejemplo, si en el regulador LM7815 conectamos una resistencia limitadora de 20 Ω, la corriente quedará fijada para un valor aproximado de:

$$I_L = 0{,}008 + \frac{15}{20} = 0{,}758 \text{ A} = 758 \text{ mA}$$

Este valor se mantendrá fijo para diferentes valores óhmicos de carga.

¿De qué potencia deberá ser como mínimo la resistencia limitadora en este caso? ¿Qué tensión aparecerá en una carga de 30 Ω.

Aparte de los reguladores integrados 78XX y 79XX existe una gran variedad de los mismos, como, por ejemplo, para tensiones fijas con tres terminales: LM109, LM209, LM309, LM123, LM223, LM323; para tensiones ajustables con tres terminales: LM117, LM217, LM317, LM137, LM237, LM337, LM138, LM238, LM338; reguladores con más de tres terminales: L200, LM105, LM205, LM305, TEA5110, A723, TEA7028, TEA7034 y otros muchos más, que hacen posible el diseño de fuentes de alimentación adecuadas a las necesidades del proyectista.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

16.6 Fuentes de alimentación conmutadas

Dado el gran avance de la integración de circuitos, hoy en día se incorporan a la mayoría de los equipos de consumo del sector electrónico las fuentes de alimentación conmutadas. En un principio, este tipo de alimentación es mucho más compleja y cara, pero posee un rendimiento mucho mayor que las fuentes de alimentación convencionales (las fuentes de alimentación conmutadas consiguen hasta un rendimiento del 80% frente al 40 o 50% de las convencionales).

En las fuentes de alimentación convencionales, tanto los transistores de control como los reguladores de tensión integrados que se conectan en serie con la carga, consiguen controlar la tensión a un valor estable a costa de producir una caída de tensión entre los terminales de entrada y salida. De esta forma, estos elementos tienen que disipar una potencia igual a dicha caída de tensión por la intensidad máxima que fluye hacia la carga. Esta potencia se considera una pérdida y se transforma íntegramente en calor, por lo que el rendimiento que se consigue es bajo, aparte del inconveniente añadido de tener que deshacerse del calor generado con voluminosas aletas de refrigeración o, incluso, ventiladores.

Las fuentes de alimentación conmutadas utilizan otro método de trabajo, ya que hacen trabajar al transistor de control, que queda en serie con la carga, en forma de conmutación. Esto significa que dicho transistor va a trabajar únicamente en dos estados: en corte o en saturación (como un interruptor abierto o como un interruptor cerrado). De esta forma, se consigue que la disipación de potencia en el transistor de control en cualquiera de los dos estados sea mínima (en corte, la corriente es prácticamente nula, mientras que la resistencia colector-emisor es elevada; en saturación, la corriente es elevada pero la resistencia colector-emisor es muy pequeña), lo que puede aumentar la corriente que controla dicho transistor respecto al utilizado en una fuente de alimentación convencional.

En la Figura 16.27 se muestra en un diagrama de bloques las partes fundamentales de que consta una fuente de alimentación conmutada.

En un primer paso, al igual que se hace en una fuente de alimentación convencional, aparece el circuito de rectificación y filtrado. Posteriormente, se dispone del circuito de conmutación, al que se le añade un transformador con núcleo de ferrita. A la salida de dicho circuito de conmutación se le conecta una nueva etapa de rectificación y filtrado. El circuito de control y regulación toma parte de la tensión de salida y la realimenta al circuito de conmutación.

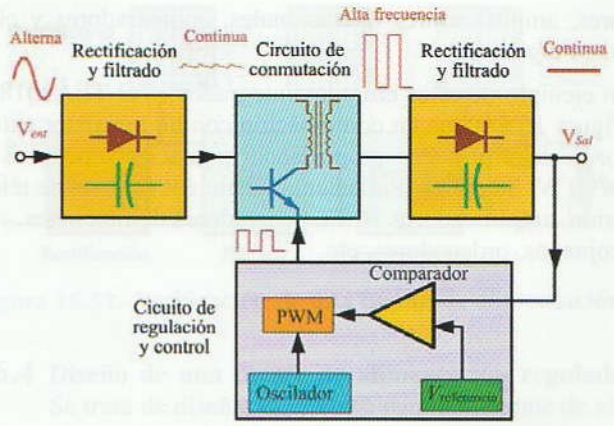


Figura 16.27. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación conmutada.

El funcionamiento simplificado de este sistema viene a ser de la siguiente forma: una vez rectificada y filtrada la tensión de entrada de C.A., el transistor de control conmuta (todo o nada) esta tensión continua a una frecuencia entre 20 y 50 kHz, con lo que se obtiene una tensión alterna de tipo triangular en su salida. Para conseguir la tensión estable deseada en la salida, el circuito de regulación gobierna al transistor de control, modificando la frecuencia de conmutación o variando el tiempo de conducción de dicho transistor. El transformador de ferrita, que se incluye en el circuito de conmutación, proporciona la tensión de salida adecuada y realiza funciones de separación con la red. Por último, se rectifica y filtra la onda cuadrada proveniente del circuito de conmutación, obteniendo al final una tensión continua estable del valor deseado.

Para cualquier desestabilización de la tensión de salida, el circuito de control y regulación ajusta automáticamente el funcionamiento del circuito de conmutación hasta conseguir el valor prefijado.

Uno de los problemas que suelen presentar las fuentes conmutadas son las radiaciones electromagnéticas que genera la onda rectangular de alta frecuencia del circuito de conmutación. Estas radiaciones pueden interferir en el funcionamiento de otras partes importantes del equipo al que se le suministra energía o provocar molestos ruidos parásitos en equipos de recepción de radio o televisión. Para evitar estos inconvenientes se añade a la entrada de la fuente de alimentación un filtro; además se apantallan aquellos circuitos o componentes causantes de la radiación.

Las fuentes conmutadas se están imponiendo en el mercado gracias a la utilización de reguladores de conmutación integrados, que incluyen, entre otros componentes, oscila-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

dores, amplificadores operacionales, comparadores y circuitos digitales.

Un ejemplo de estos circuitos integrados es el TEA2018A (Figura 16.28) que en combinación con un transistor exterior de control puede proporcionar potencias superiores a los 90 W. Se aplica fundamentalmente en: equipos de televisión, amplificadores Hi-Fi, generadores de funciones, videojuegos, ordenadores, etc.

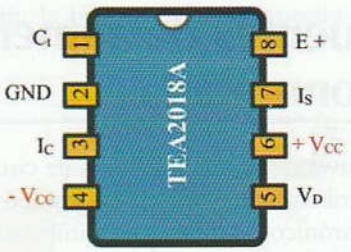


Figura 16.28. Circuito integrado TEA2018A para fuentes de alimentación conmutadas.

*** Consulta en www.paraninfo.es las hojas de características del diodo circuito integrado TEA2018A para fuentes de alimentación conmutadas.*

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

16.1 Verificación de un diodo Zener. Para comprobar si un diodo Zener está en buen estado es necesario someterlo al ensayo que se indica a continuación:

Toma un diodo Zener, por ejemplo uno de $V_z = 12$ V, y mediante una fuente de alimentación de tensión ajustable (0 a 30 V, 0,5 A) y una resistencia limitadora de 2 kΩ/1 W, monta el circuito de la Figura 16.29.

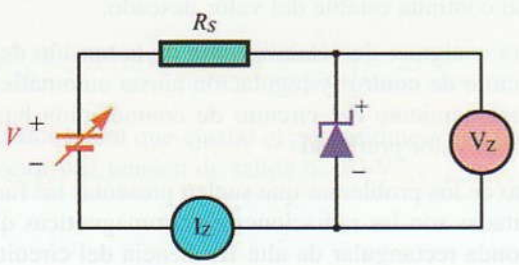


Figura 16.29. Verificación de un Zener.

Ahora, aumenta paulatinamente la tensión de la fuente y mediante el amperímetro y el voltímetro comprueba en cada momento las medidas de I_z y V_z. Para un Zener en buen estado, se debe mantener la tensión V_z a un valor estable, en torno a los 12 V, siempre que en la fuente se suministre una tensión algo superior. Comprueba cómo aumenta la corriente por el diodo Zener cuando se aumenta la tensión de alimentación por encima de los 12 V nominales del Zener, teniendo en cuenta que nunca se deberá superar la $I_{z(máx)}$ recomendada por el fabricante.

16.2 Fuente de alimentación estabilizada con diodo Zener. En la Figura 16.30 se muestra el circuito correspondiente a una fuente de alimentación estabilizada. El puente rectificador y el filtro con condensador consiguen una tensión continua con una tensión de rizado determinada. El efecto combinado del diodo Zener y la resistencia de polarización consigue reducir la tensión de rizado a valores muy pequeños y estabilizar la tensión en la carga, aunque ésta se modifique.

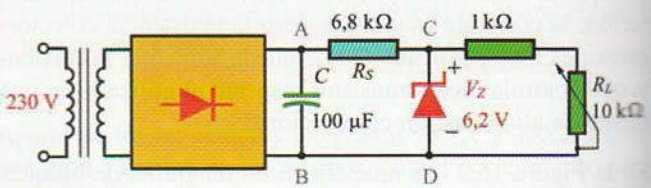


Figura 16.30.

El diodo Zener utilizado como regulador podría ser el BZX85-C6V2 o el BZY96-C6V2, es decir, un diodo que posea unos 6,2 V de tensión Zener. Para comprobar el efecto de estabilización cuando la carga se modifica, se ha utilizado un potenciómetro de 10 kΩ conectado a una resistencia fija de 1 kΩ.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

a) Consigue el Zener, observa su aspecto e identifica sus terminales. Seguidamente, consulta en las especificaciones técnicas que facilita su fabricante y anota los valores característicos más relevantes del diodo seleccionado.

b) Monta el circuito de la Figura 16.30 en el entrenador didáctico y, antes de suministrar energía al primario del transformador, sitúa en su máxima resistencia al potenciómetro que simula a la carga variable.

c) Suministra energía al circuito y mediante un osciloscopio comprueba el aspecto de la tensión de salida en el puente rectificador (puntos A-B). Realiza la misma operación para la tensión de salida del regulador (puntos C-D) y compara los resultados obtenidos, poniendo especial atención en la disminución que el regulador produce en el rizado. Con un voltímetro de C.C. mide también las tensiones en dichos puntos.

d) Varía la carga mediante el potenciómetro, haciendo que su resistencia sea cada vez más pequeña. Repite las medidas del apartado (c) en cada una de las modificaciones de la carga y comprueba el efecto estabilizador del diodo Zener para cualquier régimen de carga.

16.3 Verificación de una fuente de alimentación. Comprueba a qué tipo pertenece la fuente de alimentación del laboratorio de electrónica y observa si existe en su circuito algún regulador de tensión integrado. Si es así, identifícalo y con la ayuda de un Data Book, obtén las características más significativas del mismo.

Seguidamente, conecta una carga a la salida de la fuente de alimentación y observa con un osciloscopio la calidad de la corriente continua en las diferentes etapas de la fuente de alimentación: después de los rectificadores, después del filtrado y después del regulador integrado.

A continuación, conecta a la salida un reóstato (resistencia variable de potencia) (Figura 16.31) y modifica la corriente de carga suministrada por la fuente de alimentación, comprobando el grado de estabilidad de la tensión en la carga y calcula el porcentaje de regulación obtenido, así como su resistencia interna.

Por último, somete a la fuente de alimentación a corrientes de carga superiores a la nominal y comprueba cómo actúa el sistema de limitación de corriente.

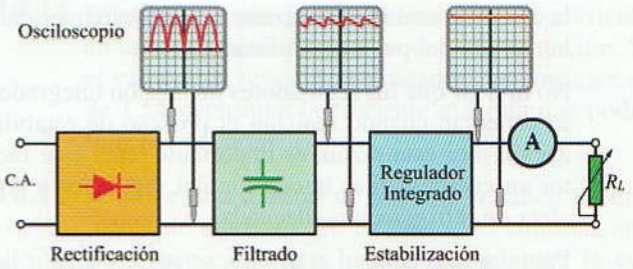


Figura 16.31. **Verificación de una fuente de alimentación.**

16.4 Diseño de una fuente de alimentación regulada. Se trata de diseñar el circuito para una fuente de alimentación estabilizada mediante un regulador de tensión integrado de la serie 78XX.

Para dar mayor versatilidad a la fuente, se le podrá incorporar un potenciómetro con el fin de poder ajustar la tensión de salida dentro de unos valores determinados. De esta forma, el esquema del circuito podría ser el de la Figura 16.32.

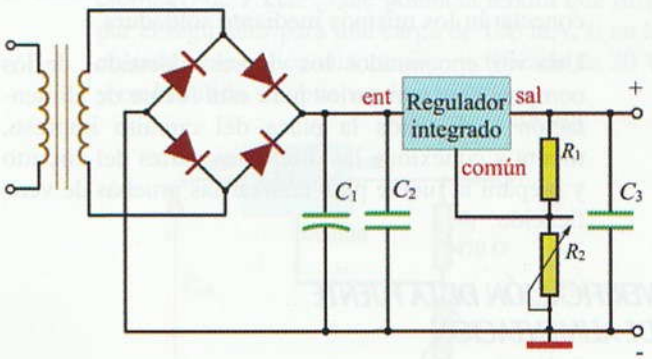


Figura 16.32.

El primer paso que habrá que dar será elegir la tensión y corriente nominal de salida. Con estos datos y con la ayuda de las especificaciones técnicas de los reguladores de tensión integrados, seleccionaremos el regulador que más se ajuste a nuestras necesidades.

Los valores del potenciómetro de ajuste R_2 y de la resistencia R_1 del divisor de tensión se calcularán para obtener las tensiones de ajustes deseadas en la salida.

Para el filtro C_1 será necesario un condensador de 2.200 µF o superior. Los condensadores antiparasitarios C_2 y C_3 podrán ser de 220 nF y 100 µF, respectivamente. Para la selección de los diodos de rectificación habrá que tener en cuenta la corriente nominal que van a suministrar, así como la tensión inversa que han de soportar. El transformador tendrá unas características tales que sea capaz de entregar

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

la corriente nominal, así como la tensión requerida a la entrada del puente rectificador.

No olvidar que los reguladores de tensión integrados se calientan cuando realizan el proceso de estabilización. Por esta razón, es importante tener este factor en cuenta y fijar la cápsula del regulador a una aleta de refrigeración adecuada.

Para dar más calidad al diseño, se sugiere añadir las siguientes mejoras:

- Incluir un interruptor para cortar la alimentación del primario del transformador.
- Incluir un fusible de calibre adecuado a la salida del transformador, con el fin de proteger el rectificador y los filtros contra posibles cortocircuitos.
- Incluir un diodo LED, con su adecuada resistencia limitadora, a la salida del puente rectificador, con el fin de señalizar el encendido de la fuente de alimentación.

Para el montaje de los componentes, será necesario el diseño de una placa de circuito impreso, donde se conectarán los mismos mediante soldadura.

Una vez encontrados los valores adecuados de los componentes necesarios para esta fuente de alimentación y diseñada la placa del circuito impreso, monta y conexiona las diferentes partes del circuito y prepara la fuente para realizar las pruebas de verificación.

VERIFICACIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Conecta una carga y un amperímetro a la salida de la fuente de alimentación y, mediante un osciloscopio, comprueba la calidad de la corriente continua en las diferentes etapas de la fuente de alimentación: después de los rectificadores y del filtrado y después del regulador integrado.

Comprueba cómo la tensión de salida se modifica al actuar sobre el potenciómetro de ajuste.

A continuación, conecta a la salida un reóstato y modifica la corriente de carga suministrada por la fuente de alimentación, comprobando el grado de estabilidad de la tensión en la carga y calcula el porcentaje de regulación obtenido, así como su resistencia interna.

Por último, somete a la fuente de alimentación a corrientes de carga superiores a la nominal y comprueba cómo actúa el sistema de limitación de corriente.

En el caso de surgir algún inconveniente de funcionamiento o una posible avería del circuito, consulta el apartado dedicado a la reparación de fuentes de alimentación incluido en la Unidad didáctica 8.

16.5 Verificación del funcionamiento de una fuente conmutada. Consigue una fuente de alimentación conmutada y realiza las siguientes operaciones:

- Analiza sus partes y explica la función que cumplen en el circuito.
- Identifica los componentes más relevantes y busca en Internet sus hojas de características.
- Conecta la fuente a la alimentación eléctrica y comprueba con el polímetro y el osciloscopio las tensiones que aparecen en las diferentes etapas de rectificación.

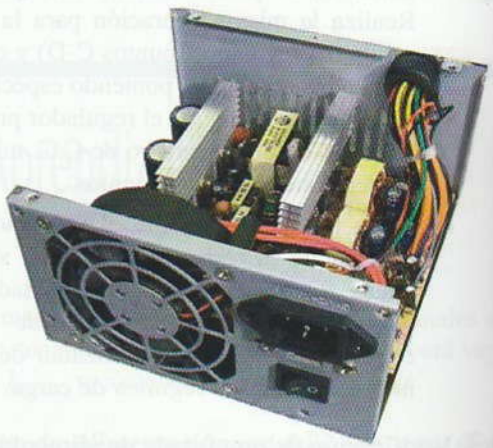


Figura 16.33. Fuente de alimentación conmutada.

AUTOEVALUACIÓN

16.1 El diodo Zener en un circuito de estabilización trabaja con polarización:

A ❑ Directa.

B ❑ Inversa.

C ❑ Por debajo de 0,7 V.

16.2 De los diodos Zener expuestos, ¿cuál sería más adecuado si aplicamos una tensión de entrada de 9 V en un circuito de estabilización en paralelo?

A ❑ BZX85-C8.

B ❑ BZX85-C9.

C ❑ BZX85-C16.

16.3 Los reguladores de tensión integrados:

A ❑ Sólo son útiles en muy limitadas aplicaciones.

B ❑ Encarecen las fuentes de alimentación.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

C ❑ Consiguen un buen efecto de estabilización en la tensión de salida y simplifican enormemente los circuitos.

16.4 ¿Cuál es la potencia que disipa un diodo Zener al que se le aplican 20 V y por el que circula una corriente de 30 mA?

16.5 Determina la variación de tensión que se provocará en un diodo Zener si éste posee una resistencia Zener de 7 Ω cuando la corriente fluctúa entre 15 y 40 mA.

16.6 Si el Zener del circuito de la Figura 16.34 posee una potencia nominal de 300 mW, determina el valor mínimo de R_s para que el diodo Zener no se destruya.

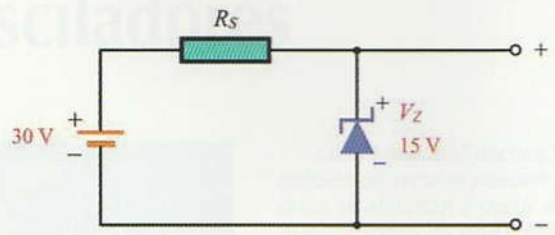


Figura 16.34.

16.7 ¿Cuál será la potencia a la que trabajará el diodo Zener del circuito de la Figura 16.34, si incluimos ahora en el circuito una resistencia de polarización R_s de 1 kΩ?

16.8 Dibuja el circuito de una fuente de alimentación con un estabilizador en serie simple a base de un transistor de control y un diodo Zener. Si la tensión de salida del puente rectificador es de 22 V y se utiliza un transistor de potencia con una ganancia de 100, determina las características del diodo Zener, para una resistencia limitadora de 1,2 kΩ, para obtener una tensión estable de 11,4 V en la salida y una corriente de 200 mA. Calcula también la potencia que disipa el transistor de potencia.

16.9 Dibuja el circuito de una fuente de alimentación con un estabilizador serie con realimentación. Si los valores de la red de realimentación son $R_2 = 1$ kΩ y $R_3 = 2$ kΩ. ¿Qué tensión obtendremos en la salida, si utilizamos un diodo Zener de 6 V?

16.10 Dibuja el circuito de una fuente de alimentación con un estabilizador en serie con realimentación para tensiones ajustables. Si el valor de $R_2 = 1$ kΩ y el potenciómetro $R_4 = 3$ kΩ y la resistencia fija $R_3 = 1$ kΩ, ¿cuál será el campo de ajuste de la tensión de salida para un diodo Zener de 6,3 V?

16.11 Dibuja el circuito básico de limitación de corriente en un estabilizador en serie con realimentación. Si el valor de la resistencia limitadora de corriente es de 1 Ω, determina la corriente máxima que podrá fluir por la carga.

16.12 Se mide una tensión de 45 V a la salida de una fuente de alimentación en vacío. Al conectar una carga que exige que la fuente suministre la corriente máxima de 2 A, la tensión cae hasta los 44,9 V. Determina la regulación en la carga y la resistencia interna de la fuente.

16.13 ¿Qué tensión se puede esperar a plena carga de una fuente de alimentación que posee una regulación del 0,1% si se mide una tensión en vacío de 12 V?

16.14 En el regulador de tensión integrado de la Figura 16.35 la corriente de reposo I_Q es de 6 mA. ¿De qué valor tendrá que ser el potenciómetro R_2 para conseguir ajustar la tensión a un valor máximo de 16 V? ¿Qué tensión se conseguiría con un potenciómetro de 1 kΩ? ¿Qué potencia tendrá que disipar el regulador para una carga de 100 mA, si en la entrada se le aplica una tensión rectificada de 30 V y en la salida se obtienen los 16 V?

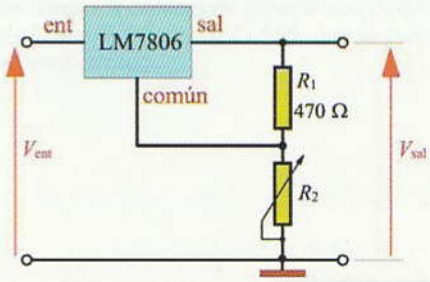


Figura 16.35.

16.15 Mediante un regulador LM705, diseña un circuito para conseguir que éste entregue a la carga una corriente fija de 508 mA.

AMPLIACIÓN

16.1 **Fuente de alimentación regulable de 15 V, 15 A.** Se trata de construir una fuente de alimentación de laboratorio ajustable con la ayuda del regulador integrado LM317. Esta fuente proporcionará una tensión de salida ajustable 1,5 y 15 V y una intensidad de corriente de 15 A.

***En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

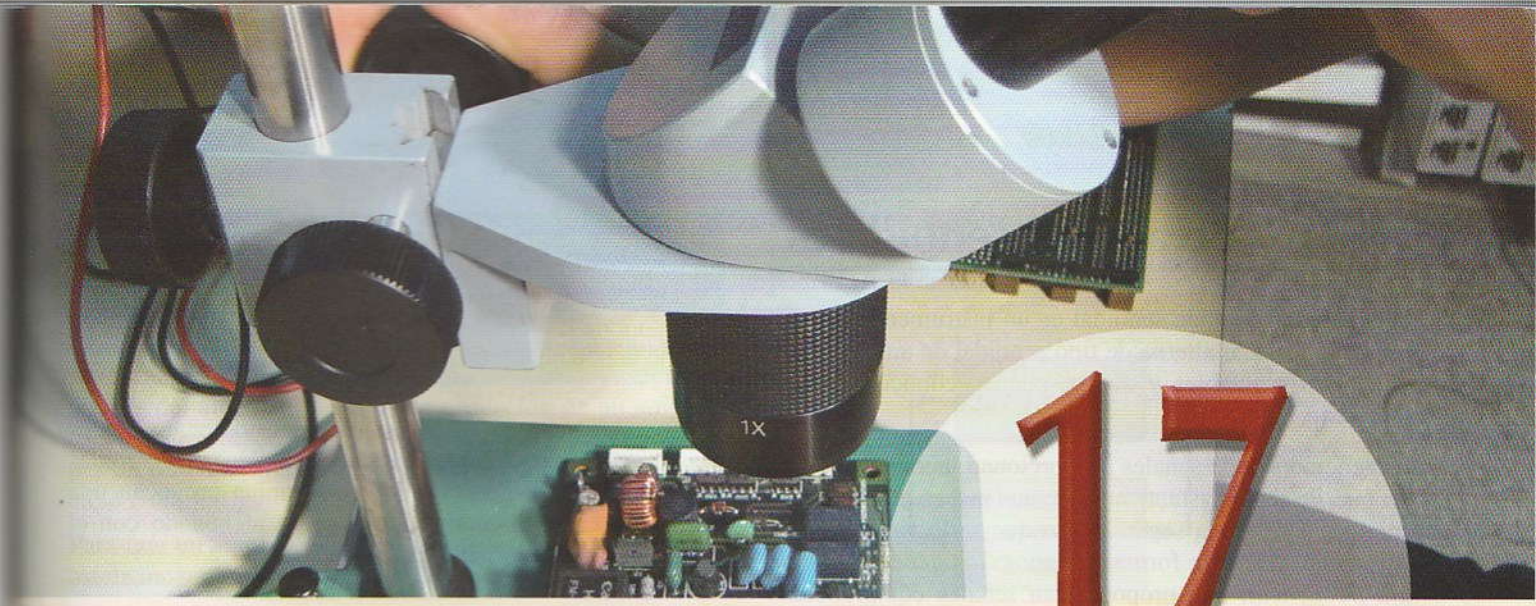
16.2 Fuente de alimentación simétrica 15 V, 1 A. Se trata de construir una fuente de alimentación con salida simétrica de 15 V y 1 A con la ayuda de los reguladores integrados LM815 y LM915. Estos reguladores proporcionan a su salida 15 V estabilizados, debiendo proporcionar a su entrada una tensión 3 V superior como mínimo para que se pueda producir el proceso de regulación.

*** En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.*

16.3 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, estudia el funcionamiento y la composición de diferentes circuitos prácticos de distintos tipos de fuentes de alimentación que puedas encontrar en Internet.

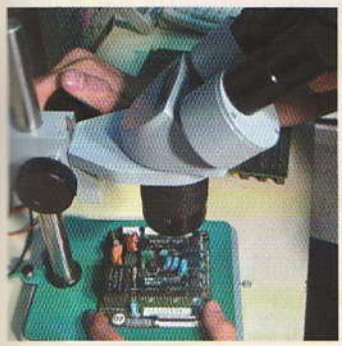
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



17

Generadores de señal y osciladores



En la Unidad didáctica 9 se estudiaron los generadores de funciones. Recuerda que los generadores de señales pueden producir señales eléctricas de unas determinadas características y que éstos se elaboran a partir de un circuito oscilador que tiene la propiedad de producir una determinada forma de onda: senoidal, triangular, cuadrada, impulsos.

Esta unidad didáctica la dedicaremos al estudio de los diferentes circuitos osciladores senoidales, así como al de los multivibradores astables (circuitos capaces de generar una onda cuadrada). También dedicaremos un apartado especial al circuito integrado CI 555, que se puede utilizar como generador de ondas cuadradas o como temporizador.

Contenido

17.1. Generadores senoidales
17.2. Multivibradores
17.3. El circuito integrado 555
17.4. Osciladores integrados
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar y describir el funcionamiento de los osciladores, explicando las características, valores de las magnitudes eléctricas, el tipo y forma de las señales presentes y el tratamiento que sufren dichas señales a lo largo del circuito.
- Distinguir los diferentes tipos de osciladores.
- Calcular la frecuencia de un oscilador.
- Estudiar las aplicaciones del CI 555.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

17.1 Generadores senoidales

Un generador de onda senoidal es un instrumento que suministra una señal alterna de tipo senoidal de amplitudes y frecuencias regulables y que se pueden conocer en todo momento.

Los generadores de señales proporcionan una gama de frecuencias de señal bastante amplia; aun así, es necesario especializar esta gama según el uso que se le vaya a dar al instrumento. De esta forma, tenemos: los *generadores de baja frecuencia*, que proporcionan señales comprendidas entre 1 Hz y 100 kHz (las señales audibles se encuentran entre 20 Hz y 20 kHz) y que son de gran utilidad para el análisis de equipos de audio; y los *generadores de alta frecuencia o radiofrecuencia*, que pueden llegar a aportar señales comprendidas entre 100 kHz y 1.000 MHz y que son imprescindibles para medir las características de los sintonizadores y las emisoras de radio.

Las señales que se suelen utilizar con más frecuencia con este tipo de generadores son siempre las de forma senoidal. Los tipos de osciladores que se utilizan para obtener la señal senoidal suelen ser los RC para las bajas frecuencias y los LC y los de cristal para las altas. Los osciladores proporcionan una frecuencia variable gracias a la incorporación de condensadores o bobinas variables. A continuación, estudiaremos, el principio de oscilación y los diferentes tipos de osciladores senoidales.

17.1.1. Principio general de oscilación

Podríamos decir que un oscilador es un dispositivo electrónico dotado para generar una señal alterna, partiendo de una alimentación de corriente continua (Figura 17.1).

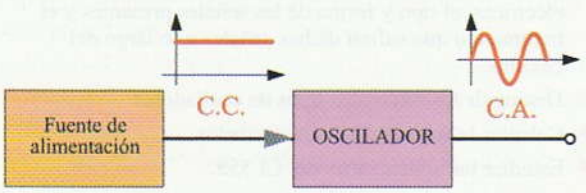


Figura 17.1. Oscilador.

Para la generación de la señal alterna se utilizan circuitos resonantes.

Recuerda que los circuitos resonantes se forman fundamentalmente mediante bobinas y condensadores conectados en serie o paralelo.

Un circuito resonante, aprovechando el intercambio de energía entre el condensador y la bobina, genera una señal de C.A. de frecuencia igual a la resonante, la cual se mantendría de forma indefinida, si tanto el condensador como la bobina fueran ideales.

Como cabía suponer, al no ser ideales estos componentes (ya que poseen una cierta resistencia óhmica), las pérdidas producidas por el condensador y la bobina provocan una oscilación en el circuito LC que se va atenuando con el tiempo, tal como se muestra en la Figura 17.2.

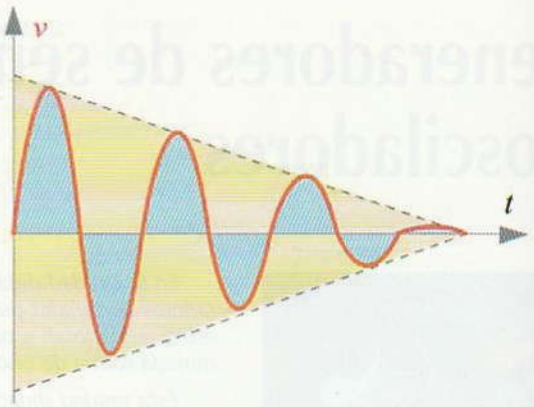


Figura 17.2. Oscilación amortiguada de un circuito resonante.

Para evitar la atenuación de la señal generada por el circuito resonante LC, y poder mantener su nivel de forma permanente, es necesario inyectar en cada ciclo de la señal la energía perdida, produciendo un efecto constante y regenerativo de la señal.

La regeneración de la señal se consigue gracias a un amplificador con una realimentación adecuada (habitualmente se utiliza la realimentación positiva). De esta forma, tendremos que un oscilador se compone básicamente de un circuito generador de la señal (circuito resonante) y de un amplificador con una realimentación que consigue regenerar la señal del circuito oscilante (Figura 17.3).

En principio, cualquier amplificador al que se le proporcione una red de realimentación positiva de la señal se

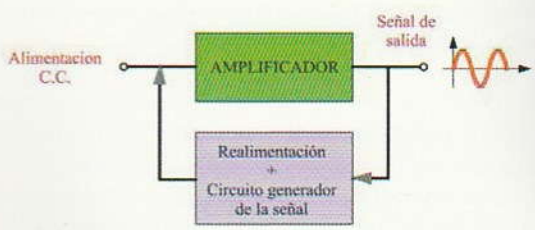


Figura 17.3. Diagrama de bloques de un oscilador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

puede convertir en un oscilador senoidal. Un ejemplo de esto podría ser el efecto que se produce cuando acercamos excesivamente el micrófono al altavoz de un amplificador de audio; en este caso se produce una especie de sonido vibratorio, que procede de la realimentación positiva que se produce al ser amplificados de nuevo los sonidos provenientes del altavoz. El efecto de oscilación de un amplificador realimentado positivamente se debe a que éste es capaz de generar y mantener su propia señal de entrada en un ciclo continuo y oscilante.

Para que un amplificador realimentado se convierta en un oscilador se deben dar dos condiciones imprescindibles:

- Que la señal proporcionada por la red de realimentación esté en fase con la entrada del amplificador.
- Que la ganancia conseguida entre el amplificador y la red de realimentación sea mayor o igual a la unidad.

En el caso de que la señal realimentada no estuviese en fase con la de entrada del amplificador, la señal se iría atenuando (esto ocurriría con una realimentación que proporcionase una inversión de fase en la salida, como, por ejemplo, en un amplificador de emisor común si conectamos su salida directamente con su entrada).

Si el conjunto formado por el amplificador y la red de realimentación poseen una realimentación igual a la unidad, la señal se auto-regenerará, lo que da como resultado una señal senoidal en la salida; sin embargo, si dicha ganancia es bastante superior a la unidad, el amplificador trabaja en los niveles extremos de corte y saturación, lo que produce una distorsión en la señal de salida que da como resultado una onda cuadrada.

De hecho, para que un oscilador senoidal consiga su propósito, debe ser capaz de poseer una ganancia superior a la unidad en el momento en que se le conecta a la alimentación de C.C., para así conseguir que la señal oscilante vaya creciendo. Posteriormente, conforme la amplitud de la señal va aumentando, dicha ganancia va disminuyendo hasta alcanzar la estabilidad en el valor igual a la unidad.

Una condición importante que deben cumplir los amplificadores utilizados en los osciladores es que deben tener una impedancia de entrada lo más elevada posible. De esta forma se consigue que la señal realimentada se vea influida por dicha impedancia. Por esta razón se utilizan, en multitud de ocasiones, circuitos osciladores con transistores de efecto de campo JFET y amplificadores operacionales.

17.1.2. Osciladores RC

Los osciladores RC se construyen partiendo de un amplificador de inversión de fase y una red de realimentación que es capaz de desfasar la señal de salida 180° e introducirla de nuevo en la entrada, tal como se muestra en la Figura 17.4. El tipo de amplificador del que estamos hablando podría ser el de emisor común.

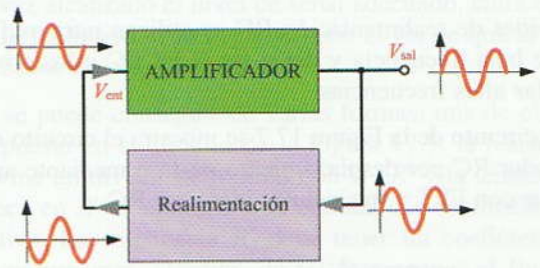


Figura 17.4. Diagrama de bloque de un oscilador RC.

En la Figura 17.5 se muestra el aspecto de una red de realimentación por desplazamiento de fase y en la 17.6 el diagrama vectorial de los sucesivos desfasamientos de la señal de salida.

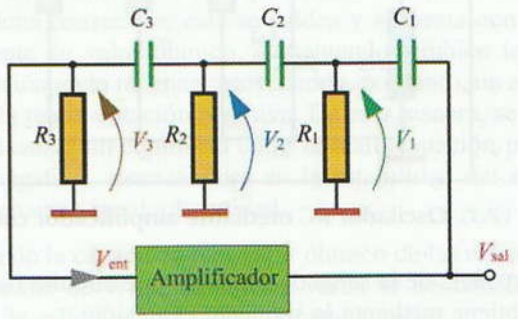


Figura 17.5. Circuito de un oscilador RC por desplazamiento de fase.

Su funcionamiento es como sigue: al aplicar la señal de salida, con tensión $V_{sal.}$, al circuito formado por R_1 y C_1, aparece por dicho circuito una corriente I_1, que quedará desfasada un ángulo φ en adelanto sobre dicha tensión. A su vez, esta corriente produce en R_1 una caída de tensión V_1, que quedará igualmente desfasada un ángulo φ, tal como se puede comprobar en la Figura 17.6. De la misma forma, las tensiones V_2 y V_3 van quedando desfasadas en un determinado ángulo. Si escogemos adecuadamente las células RC, se puede conseguir una señal de realimentación en la entrada que quede desfasada 180° con respecto a la de salida.

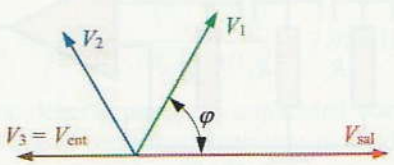


Figura 17.6. Diagrama vectorial de un oscilador RC.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la práctica se escogen células RC que provoquen un ángulo de desfase de aproximadamente 60º. El desfase total de 180º de la red de realimentación se produce exclusivamente para una frecuencia determinada.

Las redes de realimentación RC se utilizan para osciladores de baja frecuencia y dejan las redes LC y los cristales para las altas frecuencias.

En el circuito de la Figura 17.7 se muestra el circuito de un oscilador RC por desplazamiento de fase mediante amplificador con FET y tres células idénticas RC.

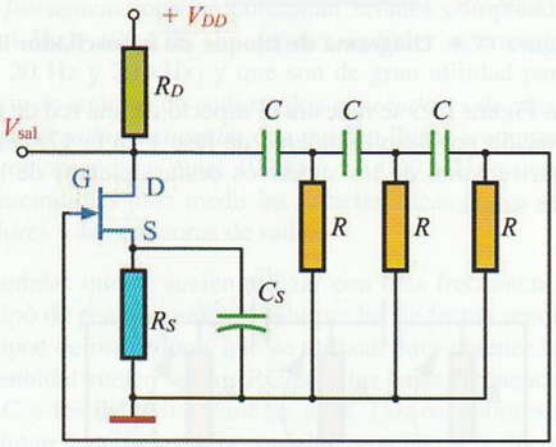


Figura 17.7. Oscilador RC mediante amplificador con FET.

La frecuencia de la señal de salida de este circuito oscilante se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2N}}$$

Donde N es el número de células RC (en este caso $N = 3$).

De esta expresión se deduce que para modificar la frecuencia entregada por el oscilador basta con variar los valores de las capacidades de los condensadores a la vez o de las resistencias.

En la Figura 17.8 se muestra un oscilador RC por desplazamiento de fase con amplificador operacional.

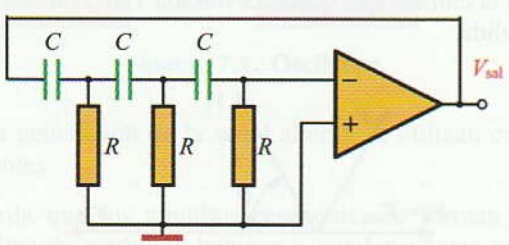


Figura 17.8. Oscilador RC amplificador operacional.

Actividad resuelta 17.1

Determina la frecuencia de la señal de salida de un oscilador RC por desplazamiento de fase si éste consta de 3 células RC de igual valor: $R = 10$ kΩ y $C = 5$ nF.

Solución: La frecuencia obtenida por las tres células RC será igual a:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot 10.000 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{2 \cdot 3}} = 1.300 \text{ Hz}$$

¿Cuál sería la frecuencia si se amplía el número de células RC a 4 y la capacidad del condensador pasa a ser 1 μF.

Oscilador en puente de Wien

Se puede decir que este oscilador también pertenece a los osciladores RC, ya que su red de realimentación consta también de redes RC, pero difieren considerablemente de las de desplazamiento de fase.

En la Figura 17.9 se muestra un oscilador formado por una red de realimentación en puente de Wien y un amplificador operacional. Para que la realimentación sea positiva, es necesario conectar la red de realimentación a la entrada no inversora de tensión. El circuito oscilante en puente de Wien consta de un circuito serie RC conectado con un circuito paralelo RC del mismo valor.

El puente de Wien funciona de la siguiente forma: para frecuencias muy bajas el condensador en serie adquiere una gran reactancia capacitiva ($X_C = 1/2\pi fC$), lo que hace que éste se comporte como un circuito abierto para la señal (V_a) que deseamos realimentar y que proviene de la salida del amplificador. A frecuencias muy altas, la reactancia

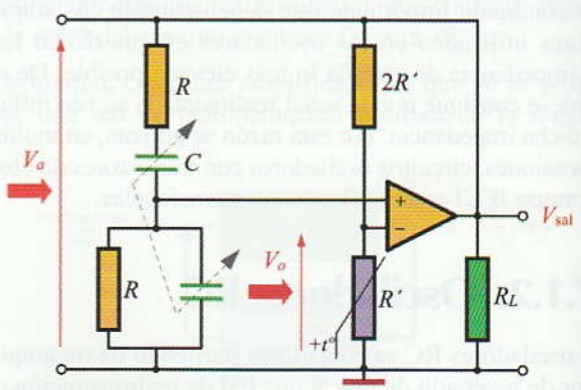


Figura 17.9. Oscilador en puente de Wien con AO.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

capacitiva se hace muy pequeña, por lo que el condensador que está conectado en paralelo cortocircuita la señal (V_a). De esta forma, en ninguno de los dos casos se consigue señal (V_o) de realimentación. Sin embargo, para una frecuencia intermedia (f_r) se consigue una señal máxima de realimentación ($V_{o\,máx}$) (Figura 17.10).

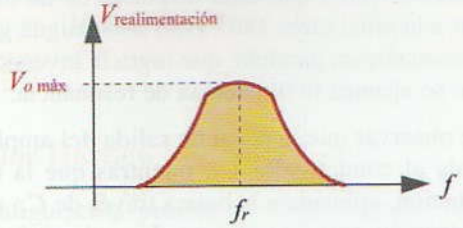


Figura 17.10. Ganancia de tensión.

Esta frecuencia coincide con la de resonancia del circuito, que viene expresada por la relación:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC}$$

Al puente de Wien también se le conoce como red de adelanto-atraso, ya que consigue un ángulo φ de desfase entre la señal aplicada (V_a) y la señal obtenida (V_o) que depende de la frecuencia, tal como se expresa en la Figura 17.11. Para frecuencias muy bajas el ángulo de desfase entre las señales es positivo, mientras que para las muy altas es negativo. En la frecuencia de resonancia, se consigue que las señales estén en fase.

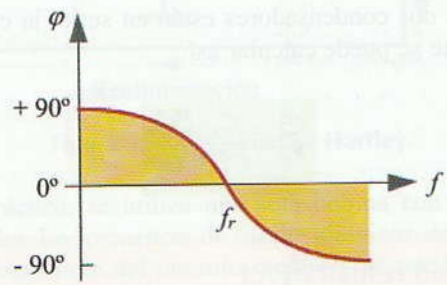


Figura 17.11. Desplazamiento de fase.

En el momento de conectar el oscilador de la Figura 17.10, se obtiene una ganancia mayor que la unidad en la salida del amplificador gracias a la realimentación positiva a través de la red RC. Como siempre existen pequeñas señales eléctricas con un gran espectro de frecuencias en los elementos conductores del amplificador, una de ellas (la de resonancia), que es la que se corresponde con la fase exacta de la entrada no inversora, es amplificada en repetidos ciclos de autorreforzamiento, por lo que en un tiempo muy reducido, aparece una señal oscilante senoidal en la salida del amplificador.

Una vez alcanzado el nivel de señal adecuado, entra en acción la realimentación negativa, con el fin de que la señal no alcance niveles de saturación.

Esto se puede conseguir de varias formas; una de ellas es la expuesta en el circuito de la Figura 17.9: la resistencia R' forma un divisor de tensión con la $2R'$ y la tensión que aparece en R' es aplicada a la entrada con realimentación negativa. La resistencia R' debe tener un coeficiente de temperatura muy elevado, de tal forma que, al fluir corriente por ella, su calentamiento aumente mucho su valor óhmico.

A tal efecto se han venido utilizando lámparas con filamento de volframio. Al conectar en un primer momento el oscilador, el valor óhmico de R' es muy pequeño y, por lo tanto, su tensión también lo es, dando como resultado una realimentación negativa muy reducida. Al pasar corriente por dicha resistencia, ésta se caldea y aumenta considerablemente su valor óhmico, aumentando también la caída de tensión en la misma y provocando, por tanto, un aumento de la realimentación negativa. De esta manera, se consigue alcanzar un equilibrio entre la realimentación positiva y la negativa, alcanzándose en la estabilidad del sistema una ganancia igual a la unidad.

Variando la capacidad o el valor óhmico de las resistencias del puente de Wien, es posible variar la frecuencia de la señal de salida en márgenes bastante amplios.

Actividad resuelta 17.2

Determina el margen obtenido en la frecuencia de la señal de salida de un oscilador en puente de Wien como el de la Figura 17.9, si la red de realimentación posee un valor de $R = 20\ k\Omega$ y una capacidad variable C entre 50 pF y 1 nF.

Solución: Aplicando la expresión de frecuencia de resonancia para los dos valores posibles de capacidad, tendremos que:

$$f_{r\,(máx)} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-12}} = 159.155\ Hz$$

$$f_{r\,(mín)} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 7.958\ Hz$$

¿Qué valor debería poseer la capacidad variable para conseguir que el oscilador obtenga a su salida un margen de frecuencia de 1 a 10 kHz?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

17.1.3. Osciladores LC

Como ya se indicó en el apartado anterior, los osciladores RC trabajan bien en la generación de bajas frecuencias (BF). Para señales de alta frecuencia (AF) es necesario diseñar otro tipo de circuitos oscilantes y uno de ellos es el circuito resonante LC. Este tipo de osciladores, también conocidos como amplificadores sintonizados, funciona bien hasta frecuencias del orden de MHz, es decir en la banda de radiofrecuencia (RF).

El principio de funcionamiento de este tipo de osciladores es similar a los ya estudiados. Ahora se combina una red de realimentación LC con un amplificador con el fin de que se mantenga la oscilación. Basándose en este principio se pueden construir diferentes clases de osciladores, como el oscilador Hartley y el oscilador Colpitts.

Tanto el oscilador Hartley como el Colpitts se basan en una red de realimentación, formada por un circuito tanque con bobinas y condensadores. Como ya se indicó al principio de esta unidad didáctica, al acoplar circuitos LC se puede encontrar una frecuencia de resonancia, en la que las bobinas intercambian su energía con los condensadores generando una señal senoidal. Como los componentes poseen una cierta resistencia óhmica, la señal generada iría amortiguándose, si no fuese por la acción autoregeneradora de un amplificador con realimentación positiva.

Oscilador Colpitts

Este oscilador es muy utilizado para generar altas frecuencias y su circuito es el que se muestra en la Figura 17.12.

Las resistencias R_1, R_2 y R_E, así como los condensadores C_3 y C_E son los típicos elementos de un amplificador de emisor común, cuyo fin es el de polarizar correctamente al transistor.

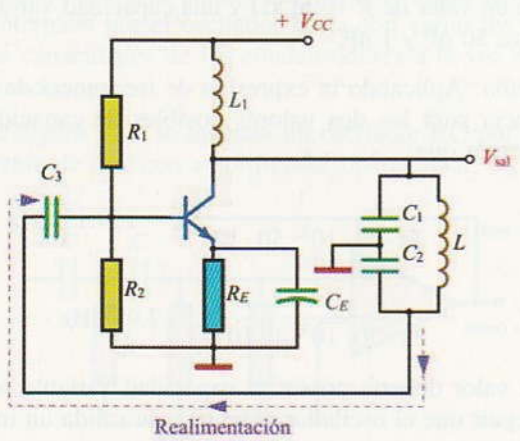


Figura 17.12. Oscilador Colpitts.

El circuito oscilante en forma de tanque de la Figura 17.12 está compuesto por los condensadores C_1, C_2 y la bobina L.

Dado que la configuración del amplificador con transistor bipolar es de emisor común, la tensión de salida queda desfasada 180° respecto de la de entrada, por lo que la red de realimentación tendrá que estar dispuesta de tal modo que haga girar a la señal otros 180°. Esto se consigue gracias al circuito resonante en paralelo, que logra la inversión de fase cuando se alcanza la frecuencia de resonancia.

Se puede observar que la señal de salida del amplificador es aplicada al condensador C_1, mientras que la señal de realimentación, aplicada a la base a través de C_3, se obtiene de la tensión correspondiente al condensador C_2. En estas circunstancias, la señal realimentada positivamente sustenta las oscilaciones generadas por el circuito tanque mientras que el amplificador proporcione suficiente ganancia en la frecuencia de oscilación del circuito resonante.

En el circuito del colector se añade una bobina L_1, conocida por el nombre de choque de RF, y que proporciona alta impedancia para la conexión del colector con la alimentación; de esta forma se consigue que la señal de alta frecuencia no se desvíe hacia la fuente de alimentación.

La frecuencia de resonancia de este oscilador se puede calcular con bastante aproximación mediante la expresión ya conocida:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Como los dos condensadores están en serie, la capacidad equivalente se puede calcular así:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Actividad resuelta 17.3

Determina la frecuencia de la señal obtenida en un oscilador tipo Colpitts como el de la Figura 17.12, si $L = 1$ mH, $C_1 = 10$ pF y $C_2 = 100$ pF.

Solución: Antes de calcular la frecuencia de resonancia del circuito tanque, calcularemos la capacidad resultante del circuito serie C_1 y C_2:

$$C = \frac{10 \cdot 100}{10 + 100} = 9{,}1 \text{ pF}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0{,}001 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-12}}} =$$

$$= 1{,}668 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 1{,}668 \text{ MHz}$$

¿Qué valor deberá poseer la inductancia de la bobina del oscilador para conseguir una frecuencia de resonancia de 1 MHz?

Oscilador Hartley

Otra configuración posible mediante circuito tanque LC es el oscilador Hartley, como el que se muestra en la Figura 17.13. Su funcionamiento es básicamente idéntico al Colpitts, con la diferencia de que ahora el circuito resonante está formado por dos bobinas L_1 y L_2 en serie y un condensador C en paralelo.

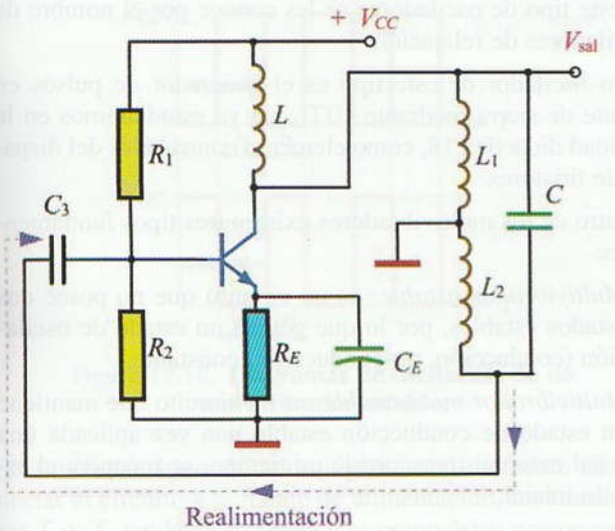


Figura 17.13. Oscilador Hartley.

En la práctica, se utiliza una sola bobina con una toma intermedia. La frecuencia de oscilación viene determinada por la resonancia del circuito tanque y se puede calcular según la expresión:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(L_1 + L_2)}}$$

17.1.4. Osciladores de cristal

Existen multitud de aplicaciones en las que es necesario que la frecuencia de la señal generada por el oscilador sea mucho más estable que la generada por los osciladores LC (puede comprobarse cómo en un oscilador de alta frecuencia es fácil que se modifique la frecuencia de la señal de salida simplemente acercando un objeto al circuito tanque); además se pueden producir variaciones en la frecuencia de oscilación debido al envejecimiento de los elementos activos y pasivos con la temperatura. En estos casos, los osciladores de cristal proporcionan una frecuencia de oscilación muy estable.

En la Figura 17.14(a) se muestra el aspecto externo de un cristal de cuarzo y en la 17.14(b) su símbolo.

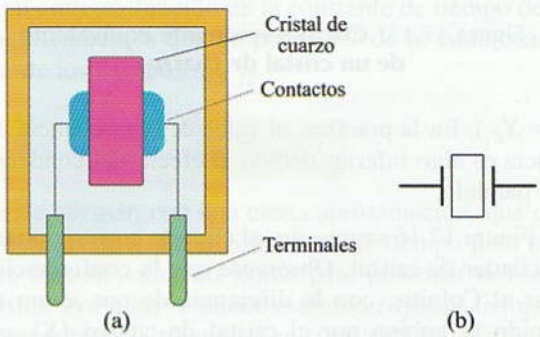


Figura 17.14. Cristal de cuarzo oscilador. (a) Estructura. (b) Símbolo.

Los cristales osciladores se construyen mediante sustancias, como el cuarzo, que poseen propiedades piezoeléctricas. El cristal suele ser muy delgado, fundamentalmente para trabajar en altas frecuencias y se encapsula en un recipiente metálico, haciendo las conexiones a ambos lados del cristal mediante un par de electrodos.

La propiedad piezoeléctrica confiere a estas sustancias la cualidad de generar una determinada tensión eléctrica entre sus caras cuando éstas son comprimidas o dilatadas mecánicamente; de análoga manera, si se aplica al cristal una tensión alterna a una determinada frecuencia, éste tiende a vibrar a dicha frecuencia. Se trata de una frecuencia propia de vibración muy estable y que se corresponde a la frecuencia propia de resonancia.

La frecuencia de resonancia de un cristal depende en gran manera del espesor del cristal; de tal forma que cuanto más grueso es el mismo, menor es dicha frecuencia.

En la Figura 17.15 se muestra el circuito resonante equivalente al comportamiento de un cristal de cuarzo. La red serie compuesta por L_1 y C_1 forma el circuito resonante serie del cristal. La resistencia en serie R_1 representa las pérdidas en el cuarzo y el condensador C_2 la capacidad que se establece entre los electrodos que se encuentran en ambas caras del cristal. Si no tenemos en cuenta la pequeña capacidad C_2, la frecuencia de resonancia del cristal se determina cuando se igualan las reactancias del circuito serie

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

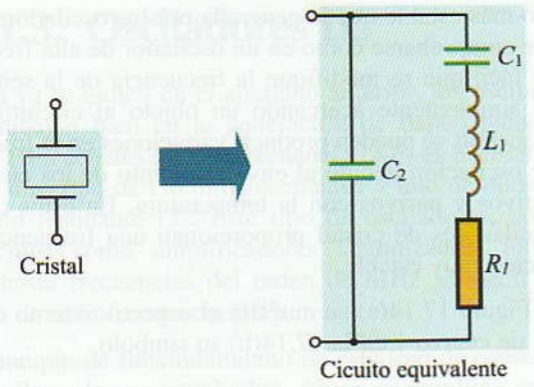


Figura 17.15. Circuito resonante equivalente de un cristal de cuarzo.

($X_{L_1} = X_{C_1}$). En la práctica, el valor de la frecuencia de resonancia es algo inferior debido al efecto del condensador C_2 en paralelo.

En la Figura 17.16 se muestra el circuito correspondiente a un oscilador de cristal. Obsérvese que la configuración es similar al Colpitts, con la diferencia de que ahora se ha sustituido la bobina por el cristal de cuarzo (X), consiguiendo que el mismo resuene con los condensadores C_1 y C_2. El funcionamiento de este circuito es igual al estudiado para el Colpitts, con la diferencia de que, eligiendo el cristal adecuado, podemos obtener una frecuencia exacta en la salida con una gran estabilidad.

Dada la gran estabilidad en la frecuencia de un oscilador a cristal (el desplazamiento de frecuencia de un cristal es menor a 1 Hz por cada 10^6 Hz), éstos encuentran gran aplicación en: relojes, emisores y receptores de radio, telefonía móvil, micrófonos inalámbricos, etc.

Los cristales de cuarzo pueden proporcionar frecuencias de hasta 10 MHz sin gran dificultad. Para frecuencias más altas es necesario disminuir drásticamente el espesor del cristal, por lo que el cristal se vuelve muy frágil y difícil de manejar; en estos casos se recurre a los cristales de sobretono. Estos cristales se tallan específicamente para utilizar armónicos de la frecuencia fundamental. De esta forma, se obtiene un efecto multiplicador de la frecuencia que da como resultado cristales capaces de oscilar hasta unos 150 MHz.

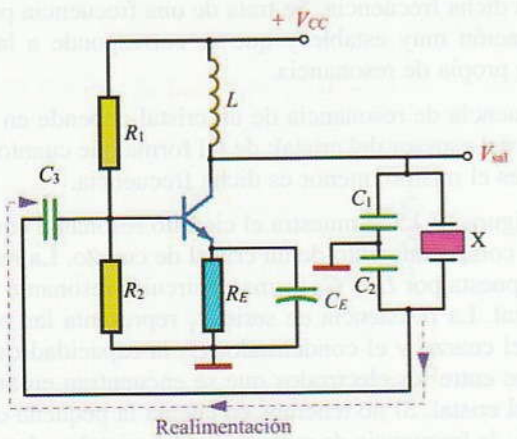


Figura 17.16. Oscilador con cristal de cuarzo.

Dado el gran avance de la electrónica digital, los cristales de cuarzo se han ido sustituyendo por sintetizadores de frecuencia digitales (circuitos digitales diseñados para sintetizar una gama amplia de frecuencias a partir de un cristal de cuarzo).

17.2 Multivibradores

A diferencia de los osciladores senoidales, los multivibradores son unos circuitos osciladores que son capaces de generar señales cuadradas o impulsos a partir de una alimentación de C.C.

A este tipo de osciladores se les conoce por el nombre de osciladores de relajación.

Otro oscilador de este tipo es el generador de pulsos en diente de sierra mediante UJT, que ya estudiaremos en la Unidad didáctica 18, como elemento controlador del disparo de tiristores.

Dentro de los multivibradores existen tres tipos fundamentales:

- *Multivibrador astable:* es un circuito que no posee dos estados estables, por lo que genera un estado de oscilación (conducción, no-conducción) constante.
- *Multivibrador monoestable:* es un circuito que mantiene un estado de conducción estable una vez aplicada una señal externa; transcurrido un tiempo, se recupera el estado inicial.
- *Multivibrador biestable:* es un circuito que posee dos estados estables de conducción; mientras no se aplique un disparo externo, permanece en uno de los estados, saliendo de él al aplicar un nuevo disparo. A este circuito también se le conoce como flip-flop y tiene gran aplicación en circuitos que utilizan técnicas digitales.

Realmente el único que posee la condición de oscilador es el multivibrador astable, que pasaremos a estudiar a continuación.

17.2.1. Multivibrador astable

En la Figura 17.17 se muestra el circuito de un multivibrador astable.

Con este circuito, es posible conseguir una señal cuadrada en cualquiera de los colectores de ambos transistores, tal

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

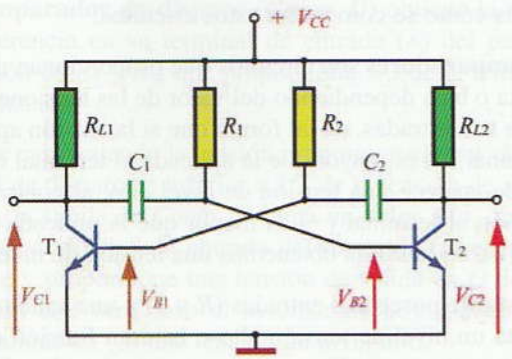


Figura 17.17. **Multivibrador astable.**

como se puede comprobar en los diagramas de la Figura 17.18, de tal forma que mientras uno de los transistores conduzca el otro no lo haga y viceversa, después de un cierto período de tiempo.

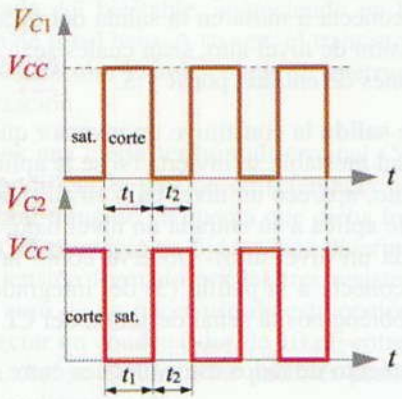


Figura 17.18. **Diagramas de oscilación de un multivibrador astable.**

Su funcionamiento es como sigue: en el momento de conectar el circuito a la fuente de alimentación, los transistores T_1 y T_2 tenderán a conducir y, como éstos no son exactamente iguales, uno de ellos tenderá a conducir en mayor grado. Supongamos que es T_1 el que se inicia con la mayor conductividad, con lo que su colector pasa de ser positivo a negativo. Esta tensión negativa aparece en el condensador C_1 y queda acoplada, a través del mismo, a la base del transistor T_2, por lo que este transistor pasa al corte. El potencial del condensador C_1 mantiene al corte al transistor T_2 hasta que la resistencia R_1 proporciona a dicho condensador una carga positiva capaz de polarizar la base de T_2. Ahora es el transistor T_2 el que conduce, mientras que se repite el mismo proceso para T_1, pasando éste ahora al corte. Así tenemos que, si T_1 conduce, T_2 no conduce; transcurrido un período de tiempo el circuito bascula y T_2 conduce mientras que T_1 no conduce, repitiéndose este proceso de oscilaciones mientras se tenga conectada la fuente de alimentación.

En los diagramas de la Figura 17.18 se muestra cómo fluctúan las tensiones V_{C_1} y V_{C_2} correspondientes a los colectores de los transistores T_1 y T_2 respectivamente. Observa cómo la tensión V_{C_2} adquiere el valor de la fuente de alimentación durante el período de tiempo t_1, posteriormente será V_{C_1} la que adquiera dicho valor durante t_2.

Los períodos de tiempo (t_1 y t_2) que los transistores se mantienen en corte y en saturación dependen de las constantes de tiempo de las redes de temporización formadas por R_1-C_1 y R_2-C_2. De esta forma, el tiempo en que el transistor T_1 se mantiene en corte está en función de la constante de tiempo de R_2 y C_2; de la misma forma T_2 se mantiene en corte en función de la constante de tiempo de R_1 y C_1. Así, tendremos que un período T de la onda cuadrada consta de los tiempos t_1 y t_2.

$$T = t_1 + t_2$$

Se puede afirmar, con una cierta aproximación, que el circuito RC necesita 0,693 constantes de tiempo para conseguir la tensión suficiente como para polarizar la base del transistor. Por ello, se puede establecer que el tiempo que se mantendrá cada transistor en corte será igual a:

$$t = 0{,}693 \cdot R \cdot C$$

Actividad resuelta 17.4

Determina la frecuencia de la onda cuadrada del multivibrador astable de la Figura 17.17, si

$$R_1 = R_2 = 25\ \text{k}\Omega \quad \text{y} \quad C_1 = C_2 = 1\ \text{nF}$$

Solución: Como las resistencias y los condensadores son iguales, obtendremos unos tiempos $t_1 = t_2 = T/2$, que se corresponderán con medio período de una onda cuadrada.

$$T/2 = 0{,}693RC = 0{,}693 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9} =$$
$$= 1{,}7325 \cdot 10^{-5}\ \text{segundos}$$

El período completo de la señal será igual a:

$$T = 2 \cdot 1{,}7325 \cdot 10^{-5} = 3{,}465 \cdot 10^{-5}$$

La frecuencia se calcula partiendo del valor del período:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}465 \cdot 10^{-5}} = 28.860\ \text{Hz}$$

¿Qué ocurriría si los valores de R_2 y C_2 fuesen 24 kΩ y 2 nF respectivamente y R_1 y C_1 se mantuviesen en los valores anteriores de 25 kΩ y 1 nF? ¿Seguirá siendo la onda cuadrada? ¿Cuál sería la frecuencia de la señal obtenida?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

17.3 El circuito integrado 555

El circuito integrado 555, también llamado temporizador integrado, es muy conocido por todos los diseñadores de circuitos electrónicos; ya que con él se pueden construir multitud de circuitos de temporización de una forma sencilla y económica, como: multivibradores astables y monoestables, temporizadores electrónicos desde microsegundos hasta horas, etc. (véanse las próximas actividades resueltas).

En la Figura 17.19, se puede apreciar la disposición y numeración de los diferentes terminales del CI 555.

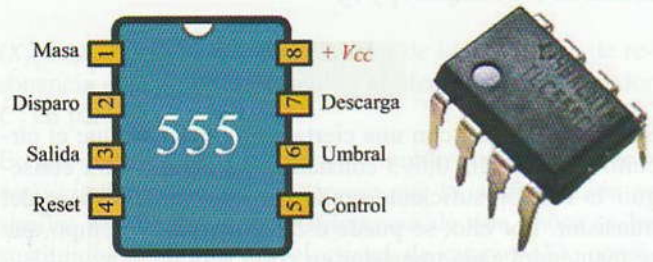


Figura 17.19. Encapsulado del CI 555.

En la Figura 17.20, se muestra el diagrama de bloques del circuito integrado 555.

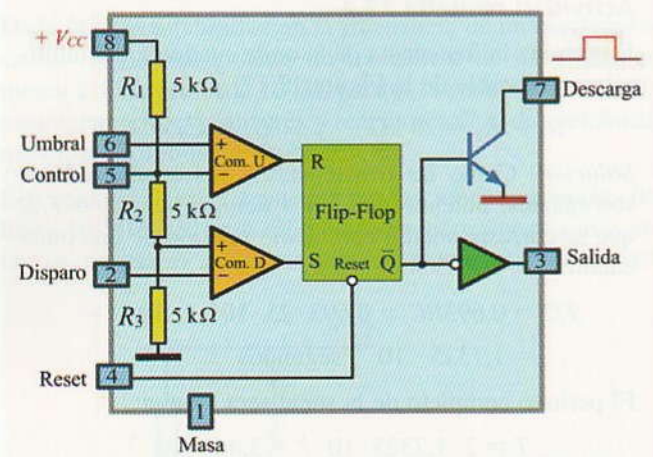


Figura 17.20. Diagrama de bloques del circuito integrado 555.

El 555 contiene dos comparadores: el de umbral (comp. U) y el de disparo (comp. D); además incorpora un multivibrador biestable o flip-flop, una entrada (2) para provocar el disparo o inicio de la temporización, un terminal de reset o puesta a cero (4), una etapa de salida (3), y un transistor que provoca la descarga del condensador principal de temporización.

Veamos cómo se comportan estos circuitos:

Los comparadores son circuitos que proporcionan una salida alta o baja dependiendo del valor de las tensiones aplicadas a sus entradas, de tal forma que si la tensión aplicada al terminal (+) es mayor que la aplicada al terminal (−), en la salida aparece una tensión de nivel alto; al contrario, si la tensión al terminal (−) es mayor que la aplicada al terminal (+), en la salida obtenemos una tensión de nivel bajo.

El biestable posee dos entradas (R y S) y una salida $\overline{Q}$ que presenta un nivel de tensión alto o bajo en función del nivel de tensión que apliquemos a sus entradas, de tal forma que si el terminal R presenta un nivel alto y el S uno bajo, se obtiene una salida de nivel alto; al contrario si el terminal de entrada R presenta un nivel bajo y el S uno alto, en la salida $\overline{Q}$ tendremos un nivel bajo.

El biestable también posee un terminal de *Reset* que se conecta a la patilla 4 del integrado (puesta a cero). Si este terminal se conecta a masa en la salida del biestable, aparece una tensión de nivel alto, sean cuales sean los niveles de las tensiones de entrada por R y S.

La etapa de salida la constituye un inversor que hace que la salida $\overline{Q}$ del biestable se invierta (si se le aplica un nivel de tensión alto, aparece un nivel bajo en su salida; al contrario, si se le aplica a su entrada un nivel bajo, proporciona a la salida un nivel alto). Observa cómo la salida del inversor se conecta a la patilla (3) del integrado y que es aquí donde obtenemos la señal de salida del CI.

El funcionamiento de todos estos bloques entre sí es como sigue:

Las resistencias R_1, R_2 y R_3 son de igual valor (5 kΩ) y se conectan entre el terminal positivo de alimentación $+V_{CC}$ y masa formando un divisor de tensión, apareciendo en cada una de ellas 1/3 de la tensión V_{CC} de alimentación.

El comparador umbral (*Comp. U*) toma como tensión de referencia en su terminal de entrada (−) la proporcionada por el punto de unión de R_1 y R_2, que coincide con 2/3 de la de alimentación.

De esta forma, mientras que la tensión aplicada a la entrada umbral (6) permanezca a un nivel que sea inferior a 2/3 de la tensión de alimentación, la tensión de salida de *Comp. U* se mantendrá baja. Ahora bien, cuando la tensión aplicada a (6) sea superior a 2/3 de la de alimentación, la salida de este comparador pasará a ser alta. En este momento la entrada R del biestable se hace alta y por tanto la salida $\overline{Q}$ del mismo se hace también alta. La etapa de salida invierte la señal, apareciendo entonces una tensión de salida en (3) de nivel bajo. En conclusión, se puede decir que con el terminal (6) *umbral* conseguimos finalizar el ciclo de temporización.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

El comparador de disparo (*Comp. D*) obtiene la tensión de referencia en su terminal de entrada (+) del punto de conexión de R_2 y R_3, que proporciona 1/3 de la tensión de alimentación.

En este caso, cuando la tensión proporcionada por el terminal (2) de disparo es inferior a 1/3 de la tensión de alimentación, la salida de *Comp. D* toma un valor alto, que aplicado al terminal *S* de entrada del biestable hace que éste bascule y proporcione una tensión de salida en $\overline{Q}$ de nivel bajo. En este otro caso el inversor de la etapa de salida proporciona en (3) una tensión de nivel alto.

Hay que hacer notar que cuando la tensión en la salida (3) se hace baja, el transistor de descarga se polariza directamente y entra en estado de saturación. Por el contrario, cuando dicha tensión se hace alta, éste se pone en corte.

En el caso de que conectemos el terminal (4) de reset a masa, la salida $\overline{Q}$ pasa inmediatamente a nivel alto sea cual sea la entrada del biestable, apareciendo en la salida (3) una tensión de nivel bajo. A su vez, el transistor de descarga pasa a saturación. Esto hace que se interrumpa el ciclo de temporización.

Si aplicamos una cierta tensión al terminal (5) de control podemos modificar la tensión de referencia del comparador de umbral (téngase en cuenta que dicha tensión de referencia en un principio es fija y viene determinada por el divisor de tensión formado por las tres resistencias en serie). En el caso de no hacer uso de esta opción, es conveniente conectar un condensador de 10 nF entre el terminal (5) y masa. Así se eliminan las posibles perturbaciones o ruidos que pudiesen surgir.

El CI 555 puede funcionar en un amplio margen de tensiones de alimentación, entre 4,5 y 16 voltios. La corriente que este circuito puede proporcionar a la salida (terminal 3) viene a ser de unos 200 mA a una tensión que se aproxima mucho a la de alimentación.

De todas las aplicaciones que se pueden hacer del 555 pasaremos a estudiar su funcionamiento en modo astable y en modo monoestable.

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del temporizador integrado 555.

17.3.1. Funcionamiento del CI 555 en modo astable

Con este modo de funcionamiento conseguimos generar una onda cuadrada de frecuencia fija, es decir, se comporta como un multivibrador astable. En la Figura 17.21 se muestra el circuito para hacer funcionar el CI 555 en modo astable.

Con este circuito se consigue una señal cuadrada como la de la Figura 17.22, en la que los tiempos t_1 y t_2 dependen de los ciclos de carga y descarga del condensador principal de temporización *C*.

El tiempo t_1 de carga viene determinado por la constante de tiempo de la red formada por las resistencias $R_1 + R_2$ y el condensador *C*, mientras que el tiempo t_2 de descarga depende de la red formada por R_2 y *C*.

$$t_1 = 0{,}693\,(R_1 + R_2)C$$
$$t_2 = 0{,}693 \cdot R_2 \cdot C$$

Observa cómo en este circuito se han unido las entradas de disparo (2) y de umbral (6), por lo que ambas quedan so-

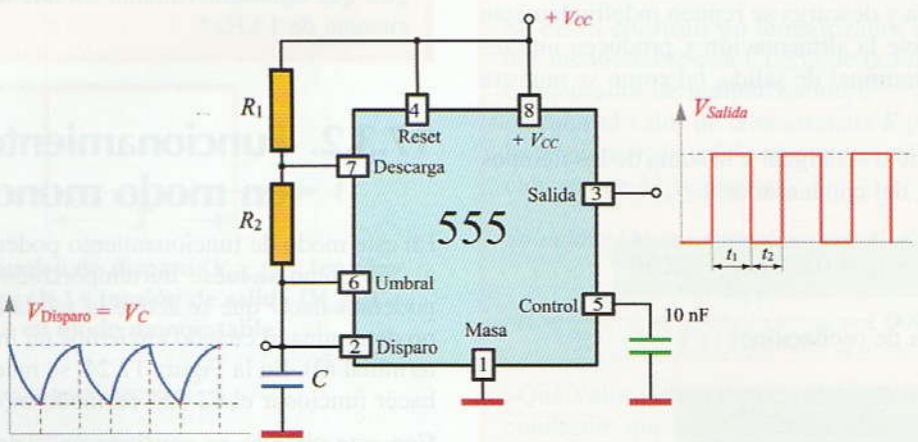


Figura 17.21. **CI 555 funcionando en modo astable.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

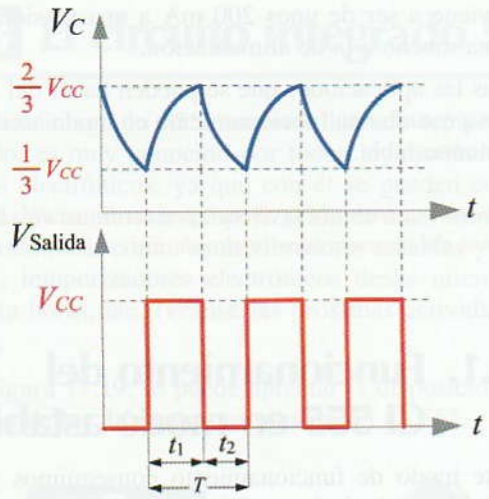


Figura 17.22. Tensión del condensador (V_C) y tensión de salida (V_{Salida}) del 555 en modo astable.

metidas a la misma tensión. De esta forma, al conectar la tensión de alimentación, si el condensador C está descargado, ambos terminales se encuentran a una tensión igual a la de masa, por lo que la tensión que aparece por el terminal (3) de salida será de nivel alto. Además, el transistor de descarga se pondrá en corte. Con esta disposición, el condensador C comenzará su ciclo de carga a través de las resistencias conectadas en serie $R_1 + R_2$.

Cuando la tensión en el condensador (V_C) alcanza un valor igual a 2/3 de la de alimentación (período de tiempo t_1), la tensión de salida por el terminal (3) se hace baja y el transistor de descarga entra en saturación. A partir de este momento comienza la descarga del condensador C a través de la resistencia R_1 (período de tiempo t_2) hasta que la tensión de dicho condensador sea igual a 1/3 de la de alimentación. En este instante la tensión de entrada S del biestable se hace alta y éste bascula para comenzar un nuevo ciclo.

Estos ciclos de carga y descarga se repiten indefinidamente hasta que se desactive la alimentación y producen una señal cuadrada en el terminal de salida, tal como se muestra en la Figura 17.22.

La duración de un ciclo será igual a la suma de los tiempos de carga y descarga del condensador:

$$T = t_1 + t_2 = 0{,}693(R_1 + 2R_2)C$$

Siendo la frecuencia de oscilación:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1{,}44}{(R_1 + 2R_2)C}$$

Actividad resuelta 17.5

El multivibrador astable con CI 555 de la Figura 17.21 posee los siguientes componentes exteriores: $R_1 = 1\ k\Omega$; $R_2 = 2\ k\Omega$ y $C = 1\ \mu F$. Si la tensión de alimentación es de 12 V, dibuja la señal de salida y calcula la frecuencia de oscilación.

Solución: Calculamos primero los tiempos de carga y descarga del condensador C:

$$t_1 = 0{,}693(R_1 + R_2)C = \\ = 0{,}693(1 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3)1 \cdot 10^{-6} = \\ = 2{,}079 \cdot 10^{-3}\ s = 2{,}1\ ms$$

$$t_2 = 0{,}693 \cdot R_2 \cdot C = 0{,}693 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = \\ = 1{,}386 \cdot 10^{-3}\ s = 1{,}4\ ms$$

$$T = t_1 + t_2 = 2{,}079 \cdot 10^{-3} + 1{,}386 \cdot 10^{-3} = \\ = 3{,}465 \cdot 10^{-3}\ s$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}465 \cdot 10^{-3}} = 288{,}6\ Hz$$

El diagrama de oscilación de la tensión de salida sería el que se muestra en la Figura 17.23.

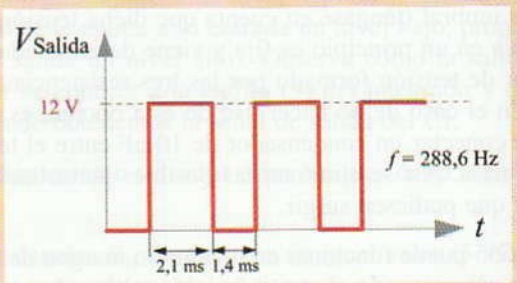


Figura 17.23.

¿Qué valor debería tener el condensador C para conseguir que este multivibrador astable trabaje con una frecuencia de 1 kHz?

17.3.2. Funcionamiento del CI 555 en modo monoestable

En este modo de funcionamiento podemos hacer funcionar al 555 como si fuese un temporizador, de tal forma que podemos hacer que se active la salida (3) durante un tiempo determinado cuando enviemos un impulso de disparo al terminal (2). En la Figura 17.24, se muestra el circuito para hacer funcionar el CI 555 en modo monoestable.

Con este circuito se consigue un ciclo de temporización, manteniéndose la salida activada durante un tiempo t des-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

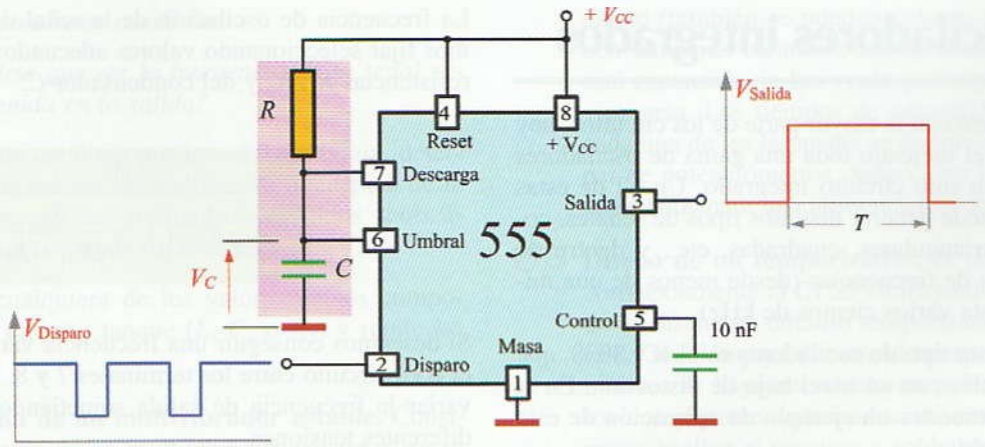


Figura 17.24. CI 555 funcionando en modo monoestable.

pués de un impulso de disparo, tal como se muestra en los diagramas de la Figura 17.25. El tiempo t de temporización depende de los valores del condensador C y de la resistencia R y se calcula de la siguiente forma:

$$t = 1{,}1 \cdot R \cdot C$$

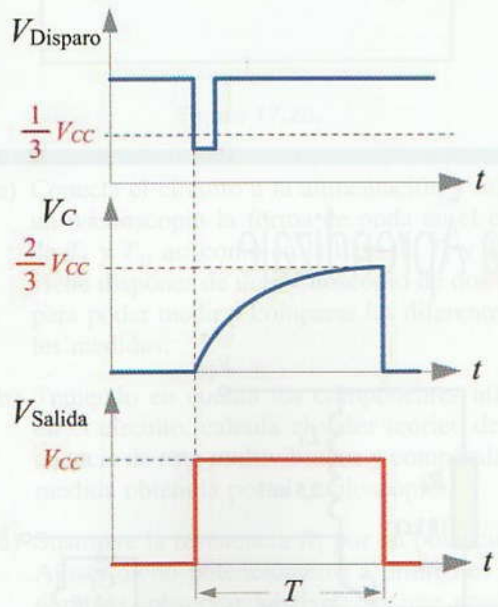


Figura 17.25. Impulso de disparo ($V_{Disparo}$), tensión del condensador (V_C) y tensión de salida (V_{Salida}) del 555 en modo monoestable.

Veamos cómo funciona este circuito:

Mientras la entrada de disparo (2) se encuentre a un nivel superior a 1/3 de la tensión de alimentación, la tensión de salida (V_{Sal}) por (3) se mantiene a un nivel bajo, que hace que el transistor de descarga se sature y mantenga descargado el condensador C. Ahora bien, cuando dicha tensión de disparo se reduce por debajo de 1/3 V_{CC}, el biestable del 555 bascula y hace que el terminal de salida (3) aparezca a un nivel de tensión alto (comienzo del ciclo de temporización). A su vez, el transistor de descarga pasa a corte y hace que el condensador C comience su ciclo de carga a través de la resistencia R. Este proceso continúa hasta que la tensión que aparece en el terminal umbral (6) se hace igual o superior a 2/3 de la tensión de alimentación (fin del ciclo de temporización). En este momento, el biestable vuelve a bascular, produce un nivel de tensión de salida baja y hace que el transistor se sature y se descargue, dejando preparado el circuito para un nuevo ciclo de temporización y a la espera de un nuevo pulso de disparo ($V_{Disparo}$).

Actividad resuelta 17.6

Se desea construir un temporizador con el multivibrador monoestable con CI 555 de la Figura 17.24 con un condensador de temporización $C = 10$ µF. Se trata de calcular el valor de la resistencia R para conseguir que la tensión en la salida durante un ciclo de temporización sea de 11 segundos.

Solución: De la expresión $t = 1{,}1 \cdot R \cdot C$

$$R = \frac{t}{1{,}1 \cdot C} = \frac{11}{1{,}1 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 1.000.000\ \Omega = 1\ \text{M}\Omega$$

¿Qué valor debería tener el condensador C y R para conseguir que este multivibrador monostable trabaje con un ciclo de temporización de 1 minuto?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

17.4 Osciladores integrados

Al igual que ocurre con la mayor parte de los circuitos, hoy en día existe en el mercado toda una gama de osciladores construidos en un solo circuito integrado. Un CI de estas características puede generar distintos tipos de señales, como senoidales, triangulares, cuadradas, etc., y dentro de una amplia gama de frecuencias (desde menos de una milésima de Hz hasta varios cientos de kHz).

Un ejemplo de este tipo de osciladores es el ICL8038, que proporciona señales con un nivel bajo de distorsión. En la Figura 17.26 se muestra un ejemplo de aplicación de este oscilador integrado.

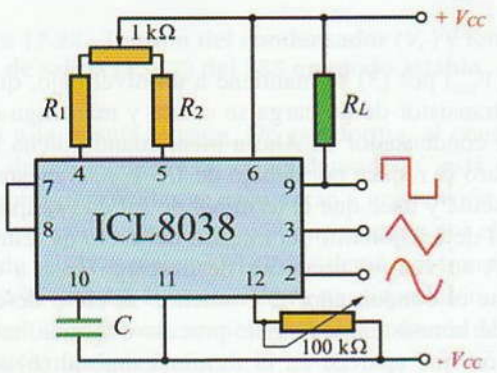


Figura 17.26. **Oscilador integrado ICL8038.**

La frecuencia de oscilación de la señal de salida la podemos fijar seleccionando valores adecuados para ello de las resistencias R_1, R_2 y del condensador C:

$$f = \frac{1}{\frac{5}{3} R_1 C \left(1 + \frac{R_1}{2R_1 - R_2}\right)}$$

Si deseamos conseguir una frecuencia variable, se elimina el cortocircuito entre los terminales 7 y 8. Ahora podremos variar la frecuencia de salida sometiendo al terminal 8 a diferentes tensiones.

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características del oscilador integrado ICL 8038.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

17.1 Características de los generadores de señal. Consigue los manuales técnicos de los generadores de señal incluidos en el instrumental del laboratorio de electrónica, comprueba sus características técnicas, así como sus posibilidades de funcionamiento.

17.2 Verificación de un oscilador. Se trata de conseguir ya montado alguno de los osciladores senoidales estudiados en esta unidad didáctica, analiza sus componentes y determina su esquema eléctrico, así como identifica el tipo de oscilador que es. En cualquier caso, de no disponer de estos circuitos, se puede montar en placa de circuito impreso el oscilador de la Figura 17.27.

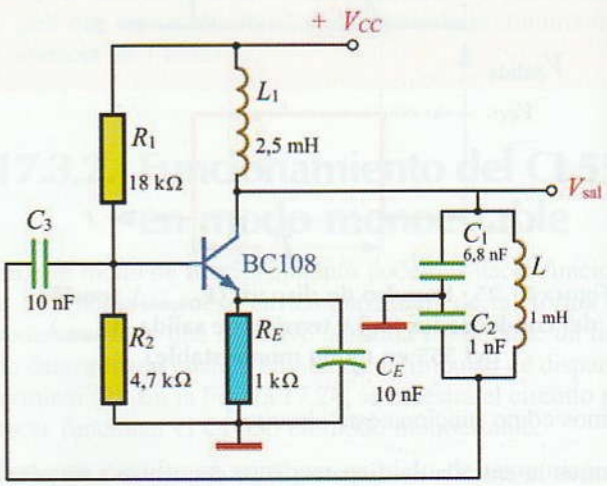


Figura 17.27.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

¿De qué tipo es este oscilador?

¿Cuál tendría que ser la frecuencia de la señal senoidal obtenida en la salida?

Mide con un osciloscopio la señal de salida, determinando los valores de amplitud y frecuencia de la señal. Compara los resultados obtenidos teóricamente con el resultado de la medida.

Modifica cualquiera de los valores de los componentes del circuito tanque (L, C_1 o C_2) y repite las medidas.

17.3 Verificación de un multivibrador astable. Consigue el circuito de un multivibrador astable o, en su defecto, monta el propuesto en la Figura 17.28.

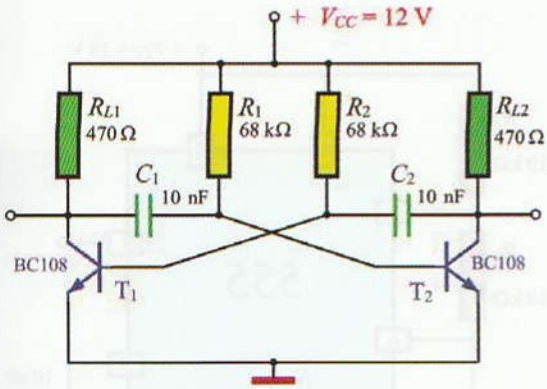


Figura 17.28.

a) Conecta el circuito a la alimentación y mide con un osciloscopio la forma de onda en el colector de T_1 y T_2, así como en la base de T_1 y T_2. Conviene disponer de un osciloscopio de dos canales para poder medir y comparar las diferentes señales medidas.

b) Teniendo en cuenta los componentes utilizados en el circuito, calcula el valor teórico de la frecuencia de este multivibrador y compárala con la medida obtenida por el osciloscopio.

c) Sustituye la resistencia R_1 por un potenciómetro. Ajusta dicho potenciómetro a diferentes valores óhmicos, observando el efecto que produce en las formas de onda del colector de uno de los transistores.

17.4 Luces para semáforo. Se trata de que diseñes un circuito de dos luces (una verde y otra roja) para semáforo. Para ello puedes utilizar el circuito típico de un multivibrador astable, sustituyendo las resistencias de carga por diodos LED polarizados adecuadamente (también se pueden colocar relés que accionen lámparas incandescentes). Mientras la luz roja está encendida, la luz verde permanecerá apagada y viceversa. Los tiempos de encendido y apagado de cada una de las lámparas se podrán controlar con un par de potenciómetros. Selecciona los componentes adecuados para una alimentación de 12 V.

17.5 Diseño de un temporizador. A partir del circuito correspondiente al CI 555 trabajando como monoestable, diseña un circuito temporizador que active un relé y una lámpara durante el tiempo que tú desees y una vez se haya accionado un pulsador. Selecciona los componentes adecuados, diseña el circuito impreso, realiza el montaje y soldadura de componentes y prueba el circuito.

¿Cómo podrías conseguir ciclos de temporización variables?

AUTOEVALUACIÓN

17.1 ¿Qué requisitos debe reunir un amplificador para convertirse en un oscilador?

A ❑ Poseer una impedancia de entrada elevada y una red de realimentación positiva.

B ❑ Poseer una impedancia de entrada reducida y una red de realimentación negativa.

C ❑ Poseer una impedancia de entrada elevada y una red de realimentación negativa.

17.2 ¿Qué red de realimentación se utiliza más para conseguir osciladores de alta frecuencia?

A ❑ La red RC.

B ❑ La red LC.

C ❑ La red simétrica.

17.3 ¿Qué oscilador consigue una frecuencia más estable?

A ❑ El oscilador RC.

B ❑ El oscilador LC.

C ❑ El oscilador de cristal.

17.4 ¿Qué valor posee la tensión de referencia del comparador umbral del CI 555?

A ❑ 1/2 de la de alimentación.

B ❑ 1/3 de la de alimentación.

C ❑ 2/3 de la de alimentación.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

17.5 ¿Qué valor posee la tensión de referencia del comparador de disparo del CI 555?

A ❑ 1/2 de la de alimentación.

B ❑ 1/3 de la de alimentación.

C ❑ 2/3 de la de alimentación.

17.6 En el circuito de la Figura 17.24 se hace funcionar al CI 555 como monoestable. ¿Qué ocurre si se conecta a masa el terminal (2) de disparo?

A ❑ Aparece un nivel de tensión alto en el terminal (3) de salida.

B ❑ Aparece un nivel de tensión bajo en el terminal (3) de salida.

C ❑ Aparece una señal cuadrada en el terminal (3) de salida.

17.7 Determina la frecuencia de la señal de salida de un oscilador RC por desplazamiento de fase, como el de la Figura 17.8, si consta de una red de realimentación con tres células RC de valores $R = 25\ k\Omega$ y $C = 18\ pF$.

17.8 ¿Cuál será el valor capacitivo que deberán poseer los condensadores de un puente de Wien, como el de la Figura 17.9, para conseguir una señal de salida de frecuencia igual a 1 kHz, teniendo en cuenta que $R = 50\ k\Omega$.

17.9 Calcula la frecuencia de la señal de salida de un oscilador Colpitts, como el de la Figura 17.12, si los componentes del circuito tanque son: $L = 20\ \mu H$ y $C_1 = C_2 = 100\ pF$.

17.10 ¿De qué valor tendrá que ser la suma de inductancias de un oscilador Hartley, como el de la Figura 17.13, para conseguir una señal senoidal en la salida de 10 MHz, si el condensador del circuito tanque es igual a 10 pF?

17.11 Calcula los tiempos t_1 y t_2 que permanecerán en saturación los transistores T_1 y T_2 del multivibrador astable de la Figura 17.29, así como la frecuencia de la onda cuadrada asimétrica obtenida.

17.12 Observa el circuito de la Figura 17.30 y contesta a las siguientes preguntas:

a) ¿Qué utilidad tiene este circuito?

A ❑ Genera una onda cuadrada asimétrica.

B ❑ Genera un pulso de temporización.

C ❑ Funciona como multivibrador monoestable.

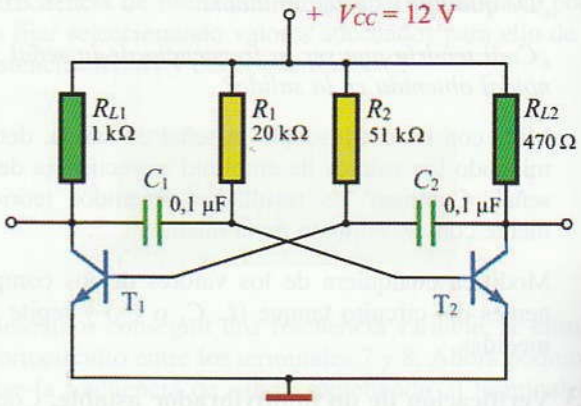


Figura 17.29.

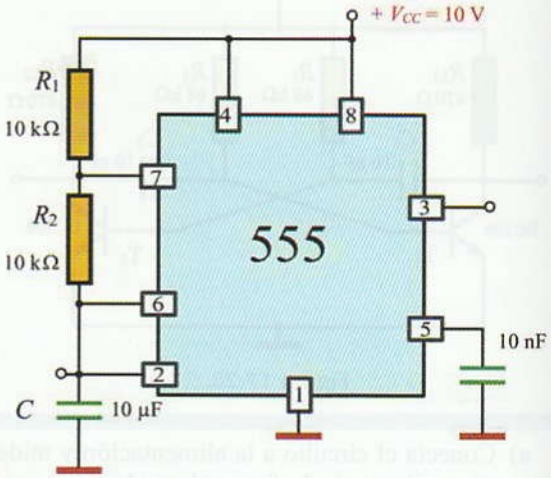


Figura 17.30.

b) ¿Para qué valores de la tensión de disparo se activa y desactiva la salida?

c) Calcula la frecuencia de oscilación.

AMPLIACIÓN

17.1 Circuito de un multivibrador astable con 555. Se trata de construir un multivibrador astable, que pueda ajustarse entre los 300 Hz y 10 kHz, con la ayuda del temporizador 555.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

17.2 Circuito de un temporizador monoestable con 555. Se trata de construir un temporizador con un

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

555 con el fin de que un diodo LED se encienda durante un período de tiempo determinado.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

17.3 Circuito de alarma activada por luz. Se trata de construir una alarma que se activa mediante un fotodiodo. Éste pone en marcha un multivibrador astable basado en el CI 555. Éste está configurado para producir una señal audible de unos 480 Hz en un altavoz.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

17.4 Circuito de una sirena bitonal. Se trata de construir mediante transistores un oscilador biestable. Éste genera una señal que, al ser aplicada a un altavoz, a través de un sencillo amplificador a base de transistores, consigue el sonido deseado.

En www.paraninfo.es se incluye el circuito electrónico correspondiente a esta aplicación práctica.

17.5 Como en otras ocasiones, consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, estudia el funcionamiento y la composición de diferentes circuitos prácticos con osciladores y multivibradores que puedas encontrar en Internet.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

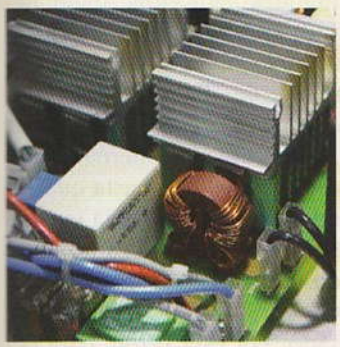
Ele
de

18.1. Ti
18.2. El
18.3. El
18.4. El
18.5. El
18.6. M
Activida

WWW.AUTODIDACTA.INFO

18

Electrónica de potencia-tiristores



Los tiristores son una serie de componentes semiconductores que poseen unas características que los hacen ideales para trabajar en el control de grandes corrientes eléctricas. Este tipo de semiconductores tiene un gran campo de aplicación en la electrónica industrial o electrónica de potencia. Con ellos es posible controlar la potencia de receptores en C.C. y en C.A. De esta forma, es posible regular la velocidad de motores eléctricos, controlar la intensidad luminosa de equipos de alumbrado, sustituir a los relés y contactores electromecánicos en el control y accionamiento de dispositivos de potencia por relés estáticos a base de semiconductores, convertir la corriente continua en alterna, etc.

Contenido

18.1. **Tiristores**
18.2. **El rectificador controlado de silicio (SCR)**
18.3. **El diac**
18.4. **El triac**
18.5. **El transistor de unijuntura (UJT)**
18.6. **Modulación PWM**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Analizar la tipología y características funcionales de los tiristores.
- Describir las curvas características más representativas de los tiristores, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- Interpretar los parámetros fundamentales que aparecen en las hojas técnicas de los fabricantes de tiristores.
- Aplicar los tiristores a circuitos de control de potencia.
- Describir el proceso de modulación PWM.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

18.1 Tiristores

Los tiristores trabajan en forma de conmutación; es decir, poseen dos estados de funcionamiento: conducen o no conducen. De esta forma es posible controlar grandes corrientes eléctricas sin que el semiconductor se caliente excesivamente. Como ejemplo de tiristores tenemos el rectificador controlador de silicio (SCR) y el triac. El SCR es similar a un diodo rectificador, pero al que se le ha añadido un tercer terminal de puerta con el que se consigue iniciar la conducción del mismo [Figura 18.1(a)]. El triac también posee un tercer terminal de puerta, pero está preparado para conducir en ambos sentidos, a diferencia del SCR que conduce en uno solo, por lo que es capaz de controlar los dos semiciclos de la C.A. [Figura 18.1(b)].

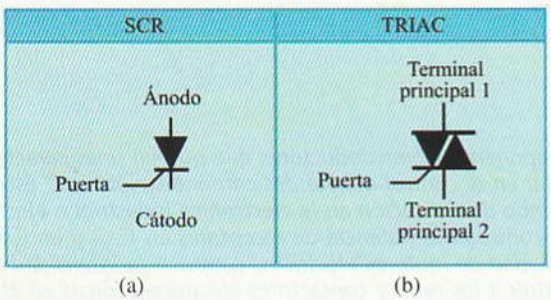


Figura 18.1. Representación esquemática de tiristores. (a) El SCR. (b) El triac.

Los tiristores son unos componentes semiconductores que poseen tres uniones, a diferencia de las dos con las que se construyen los transistores comunes. Estudiaremos primero el diodo PNPN de cuatro capas, y posteriormente pasaremos al estudio concreto del tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR).

A partir de este elemento, aparecen otros con algunas variantes, como son los diac, triac y UJT.

18.2 El rectificador controlado de silicio (SCR)

Este elemento constituye uno de los dispositivos electrónicos más adecuados para sustituir al relé electromagnético. Su funcionamiento es muy rápido, seguro y, al no poseer contactos móviles, de gran duración.

Para entender mejor el funcionamiento de este dispositivo, vamos a ocuparnos primero de analizar un circuito denominado candado, o cerrojo, formado por dos transistores bipolares y que actúa de una forma similar al SCR. En la Figura 18.2, se muestra dicho circuito:

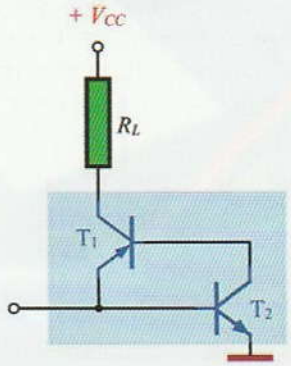


Figura 18.2. Candado a base de dos transistores.

En este circuito, existen dos transistores, uno PNP y otro NPN. El emisor de T_1 se conecta directamente con la base de T_2 y, a su vez, el colector de T_2 está conectado con la base de T_1. Este conjunto forma un elemento de memoria, que actúa de la siguiente forma:

Si aplicamos una tensión positiva al terminal libre de la base del transistor T_2, éste entra en conducción, lo que hace que la corriente de su colector aumente y ponga en conducción al transistor T_1. Esto provoca, a su vez, la aparición de corriente en el emisor de T_1, que por estar conectado a la base de T_2, hace que T_2 conduzca más, por lo tanto, también lo hará T_1. Este aumento alternativo de las corrientes en ambos transistores continúa hasta que éstos se saturan. Si en estas condiciones retiramos la tensión de polarización de la base de T_2, los transistores no cambiarán de estado de conducción, ya que existe un ciclo continuo de realimentación de corriente. En este momento se dice que el candado está cerrado. Por esta razón, para cerrar un candado es suficiente con aplicar al terminal de la base de T_2 un pequeño impulso de corriente de polarización directa, tal como se muestra en la Figura 18.3.

Otra forma de cerrar el candado formado por T_1 y T_2 es aplicando una tensión de alimentación V_{CC} muy grande. Así se consigue forzar a los transistores a entrar en ruptura.

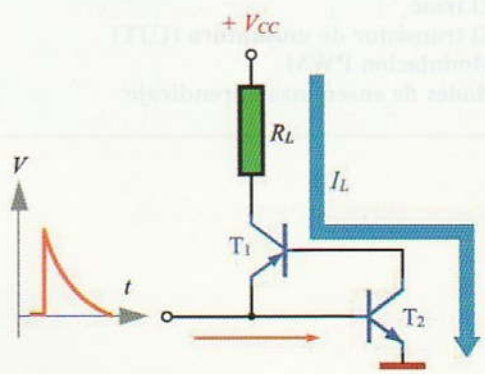


Figura 18.3. El candado se cierra con un impulso de polarización directa.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En el momento en que cualquiera de éstos comience a conducir, aparecerá un ciclo continuo de realimentación que los pondrá en saturación. Es decir, se cerrará el candado y fluirá corriente por la resistencia de carga.

Para abrir el candado, es suficiente con interrumpir el circuito de alimentación; de esta manera se elimina la corriente de regeneración y los transistores, en un proceso continuo de disminución de corriente de polarización, entran en corte.

Otra forma de producir la apertura del candado es aplicando una tensión de polarización negativa a la base de T_2 en forma de impulso de corta duración.

En resumen, el candado posee dos estados fundamentales de funcionamiento, uno es en corte y otro en saturación. En otras palabras, como interruptor abierto o como interruptor cerrado.

El circuito candado formado por los transistores T_1 y T_2 (Figura 18.3) se puede integrar en un solo componente denominado diodo de cuatro capas, o rectificador controlado de silicio (SCR). En la Figura 18.4 se puede apreciar su composición y su símbolo.

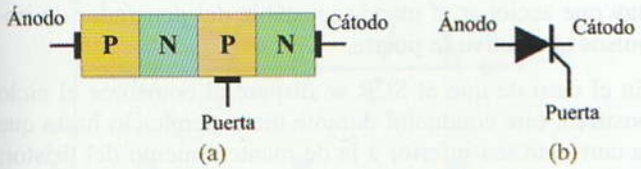


Figura 18.4. Rectificador controlado de silicio (SCR). (a) Composición. (b) Símbolo.

Este dispositivo conduce únicamente en un sentido cuando se cumplen las condiciones de disparo que, como en el caso del candado, se darán cuando se excite positivamente la puerta o cuando se supere la tensión de ruptura del mismo. En las hojas de especificaciones técnicas de los SCR se facilitan los valores de tensión y corriente de disparo. Así, por ejemplo, el tiristor 2N689A posee una tensión de disparo de ruptura directa (V_d) de unos 500 V.

Por lo general, los SCR no están preparados para ser activados por tensión de ruptura; por esta razón, éstos casi siempre se diseñan para cerrarse por disparo de puerta.

18.2.1. Curvas características del SCR

En la Figura 18.5 se muestra la curva característica de tensión-corriente directa de un SCR.

En esta curva no se ha tenido en cuenta la corriente de polarización de puerta (se ha trazado para $I_g = 0$). En ella, se puede observar que, para que el SCR entre en conducción, es necesario aplicar una tensión directa (V_d) bastante elevada entre el ánodo y el cátodo.

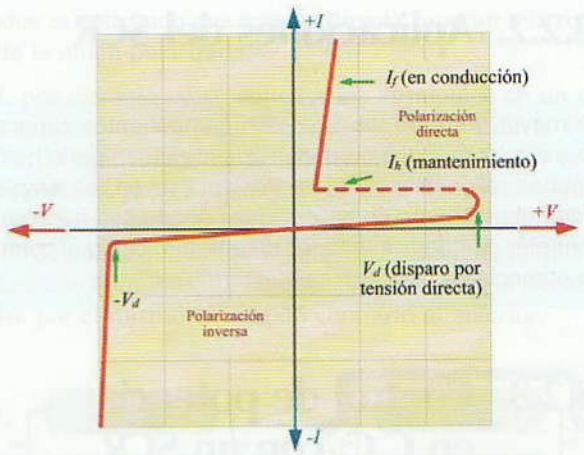


Figura 18.5. Curva característica del SCR.

Una vez disparado el SCR, éste se pone en conducción y aumenta su corriente directa, comportándose como un interruptor cerrado. Por lo general, las corrientes directas que son capaces de conducir los SCR pueden llegar hasta algunos miles de amperios, lo que los hace ideales para aplicaciones de tipo industrial (control de potencia de elementos de calefacción, iluminación, motores eléctricos, etc.). Así, por ejemplo, el SCR 2N689A es capaz de conducir una corriente de 25 A con una pequeña corriente de disparo de 40 mA; o el CR100AL, que es capaz de manejar una corriente de 100 A con una corriente de disparo de 100 mA.

Es importante observar en las curvas que, para que el SCR permanezca en el estado de conducción, es necesario que por él circule una corriente mínima de mantenimiento (I_h). Para el 2N689, esta corriente es de 50 mA. En la región de polarización inversa el SCR se comporta como un diodo normal.

En resumen, la forma habitual de disparar un SCR es aplicando a la puerta un pulso. Para desactivar el SCR bastará con reducir la corriente directa de éste hasta un valor inferior a la de mantenimiento.

Actividad propuesta 18.1

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de los SCR: 2N689 y CR100AL. Consulta los valores característicos más significativos de ambos SCR y compáralos.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

18.2.2. Aplicaciones del SCR

La mayor parte de los SCR son componentes capaces de manejar grandes corrientes, desde un amperio hasta algunos miles de amperios. Por esta razón, se emplea fundamentalmente en aplicaciones donde sea necesario controlar grandes cantidades de energía, como el control de potencia en motores, calefactores, etc.

18.2.3. Control de potencia en C.C. con un SCR

En el circuito de la Figura 18.6 se muestra el circuito de control de potencia de una carga (como ejemplo hemos conectado como carga la resistencia calefactora de 10 Ω correspondiente a una estufa eléctrica).

En el circuito de la Figura 18.6(a), podemos hacer que el SCR entre en conducción, aplicando un pequeño impulso, de unos 2 V, a su puerta. Mediante este pequeño impulso podemos controlar la gran corriente que fluye por el SCR hacia la carga, que será aproximadamente de unos: $I = V/R = 200/10 = 20$ A (para hacer este cálculo no se ha tenido en cuenta la pequeña caída de tensión que se produce entre el ánodo y cátodo del SCR, ya que ésta es del orden de 1 V). Por supuesto, las características nominales del SCR deberán ser tales que soporten la intensidad de la carga sin sufrir daños.

Una vez disparado el SCR, éste continúa conduciendo, aunque el impulso de puerta desaparezca, tal como se muestra en los gráficos de la Figura 18.6(b). Para provocar la desconexión del SCR es necesario disminuir la corriente de carga a un valor inferior al de mantenimiento. Esto se consigue accionando el pulsador P durante un corto período de tiempo (este tiempo puede llegar a ser menor a 50 μs).

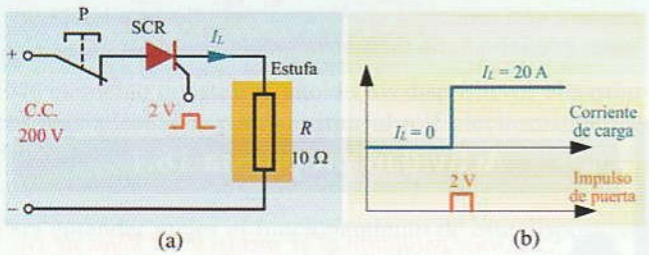


Figura 18.6. Circuito de control de una estufa mediante SCR. (a) Esquema eléctrico. (b) Impulso de disparo del SCR.

18.2.4. Control de potencia en C.A. con un SCR

Seguidamente, vamos a mostrar un ejemplo de aplicación del SCR como elemento de control de potencia de una lámpara de C.A. En la Figura 18.7 aparece un circuito de este tipo.

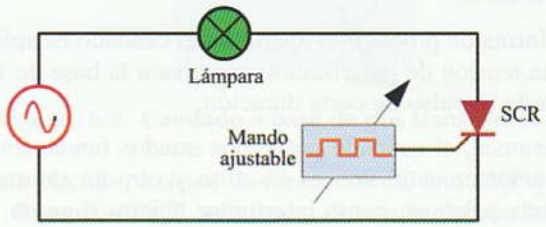


Figura 18.7. Control de potencia de una carga de C.A. mediante SCR.

El SCR conduce únicamente cuando se le aplica un impulso de corriente de polarización en su terminal de puerta y se desactiva automáticamente cuando la corriente pasa por cero. Para poder controlar el tiempo de disparo del SCR, hay que accionar el mando ajustable del generador de impulsos que activa la puerta.

En el caso de que el SCR se dispare al comenzar el ciclo positivo, éste conducirá durante dicho semiciclo hasta que la corriente sea inferior a la de mantenimiento del tiristor; es decir, aproximadamente hasta que ésta se haga cero, tal como se muestra en la Figura 18.8(a). En este caso el SCR está activado durante el tiempo t_1 y, por tanto, se comporta como un rectificador de media onda. La potencia que se transfiere a la lámpara es la máxima y ésta luce con toda su intensidad.

En la Figura 18.8(b) el SCR es disparado después de comenzado el ciclo, por lo que la corriente circula por la lámpara tan sólo durante el tiempo t_2. En este caso la lámpara baja su intensidad luminosa.

En las Figuras 18.8(c) y (d), se ha reducido drásticamente el tiempo de conducción del SCR, por lo que la potencia que se entrega a la lámpara es mínima. De esta forma, con una pequeña corriente de control de los impulsos de disparo del SCR podemos controlar grandes cantidades de potencia de la carga.

18.3 El diac

A diferencia del SCR, que únicamente admitía el paso de la corriente en un sentido, el diac permite que ésta fluya en ambos sentidos. Este dispositivo sólo posee dos terminales.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

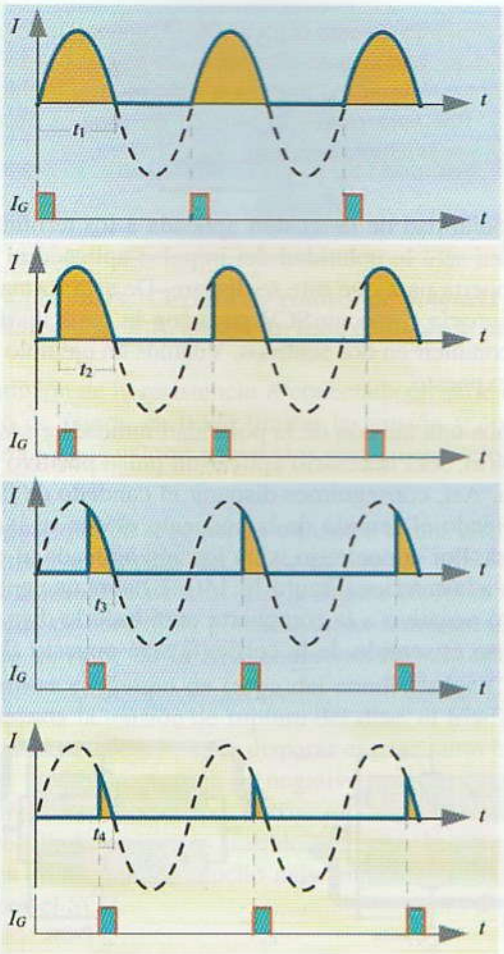


Figura 18.8. Impulsos de disparo y tiempos de conducción del SCR.

La aplicación fundamental de este dispositivo es la de producir los impulsos de disparo para los SCR y triacs.

Un diac está constituido por dos diodos de cuatro capas conectados en paralelo y en oposición, a los que se les ha desprovisto del terminal de puerta. En la Figura 18.9 se muestra su constitución y su símbolo.

El resultado obtenido son dos candados conectados en derivación. Dado que no existe terminal de puerta, la única forma de que exista conducción en cualquiera de los dos

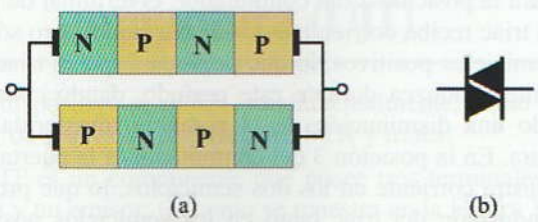


Figura 18.9. Diac. (a) Composición. (b) Representación esquemática.

diodos es aplicando una tensión directa superior a la ruptura de la unión polarizada.

Así, por ejemplo, si se aplica a los terminales de un diac una tensión con la polaridad que se muestra en la Figura 18.10(a), el diodo de la izquierda se disparará y la corriente fluirá por el mismo en el sentido indicado. En el caso de que la tensión aplicada sea opuesta a la primera, tal como se indica en la Figura 18.10(b), el diodo que quedará polarizado será el de la derecha y, por tanto, la corriente fluirá por el mismo en sentido contrario al anterior.

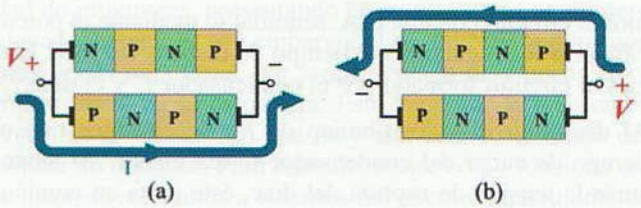


Figura 18.10. Conducción del diac.

La forma de que deje de conducir un diac, una vez disparado, es reduciendo la corriente directa a un valor inferior al de mantenimiento.

En la Figura 18.11, se puede apreciar la curva característica de un diac.

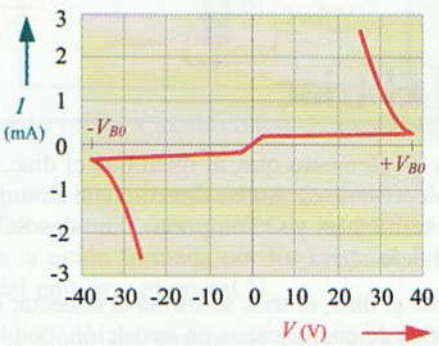


Figura 18.11. Curva característica del diac.

Aquí se puede comprobar que, hasta que no se supere la tensión de ruptura V_{BO}, el diac no entra en conducción y que además ésta puede ser positiva ($+V_{BO}$) o negativa ($-V_{BO}$).

Si aplicamos un C.A. a un diac, éste conduce en ambos sentidos cuando la tensión supere a la de ruptura.

18.3.1. SCR controlado por diac

En la Figura 18.12, se muestra una de las aplicaciones que se puede hacer del diac. Se trata de controlar la potencia de un horno mediante un SCR y un diac. Para ello alimenta-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

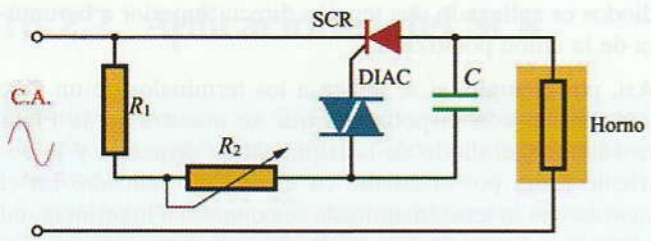


Figura 18.12. Control de potencia de una carga de C.A. mediante SCR controlado por diac.

mos al circuito con una C.A. senoidal y, mediante el potenciómetro R_2, regulamos el tiempo de disparo del SCR gracias al circuito formado por el condensador C y el diac.

Al disminuir el valor óhmico de R_2, se consigue que el tiempo de carga del condensador C sea menor. Al alcanzarse la tensión de ruptura del diac, éste entra en conducción y descarga el condensador hacia la puerta del SCR, provocando el disparo del mismo. De esta forma, variando el valor del potenciómetro R_2 podemos conseguir variar el período de conducción del SCR y con él la potencia del horno. En este circuito el SCR sólo conduce durante el semiciclo negativo, permaneciendo bloqueado durante el semiciclo positivo. Para conseguir que este circuito alimente al receptor durante los dos semiciclos, será necesario el empleo de un nuevo componente: el triac.

18.4 El triac

El triac es un elemento que, al igual que el diac, admite el paso de la corriente en ambas direcciones. Este dispositivo posee tres terminales y se comporta como dos SCR invertidos en paralelo.

Al igual que el diac, el triac se forma al conectar en paralelo dos diodos de cuatro capas en oposición, con la diferencia de que ahora se conserva el terminal común de puerta. En la Figura 18.13(a), se puede ver su constitución y en la 18.13(b), su símbolo.

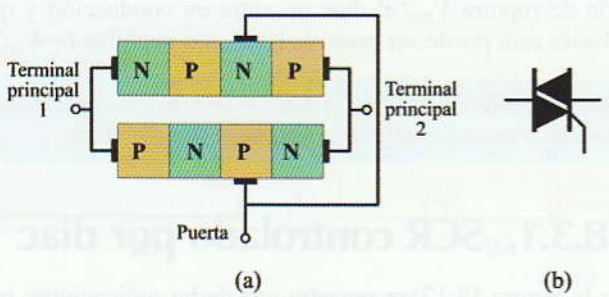


Figura 18.13. Triac. (a) Constitución. (b) Representación esquemática.

El funcionamiento de este dispositivo es básicamente como el del diac, con la gran diferencia de que ahora se le puede disparar mediante impulsos aplicados al terminal de puerta. Por esta razón, la tensión de ruptura de un triac suele ser bastante elevada.

Según la polaridad de la tensión aplicada a los terminales del triac, así será la polaridad del impulso aplicado al terminal de puerta para que éste se dispare. De esta forma, un triac funcionaría como un SCR pero con la particularidad de poder conducir en dos sentidos. Veamos un ejemplo que aclare lo expuesto.

Si aplicamos una tensión de la polaridad indicada en la Figura 18.14(a), será necesario aplicar un pulso positivo a la compuerta. Así, conseguimos disparar el candado de la izquierda, siendo el sentido de la corriente el que se indica en la figura. Por el contrario, si la tensión aplicada al triac es opuesta a la anterior [Figura 18.14(b)], habrá que aplicar un impulso negativo a la compuerta para hacerle disparar. En este caso el sentido de la corriente será opuesto al anterior.

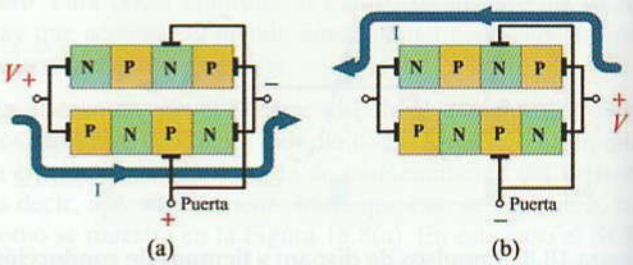


Figura 18.14. Conducción del triac.

La aplicación fundamental de los triacs está en el control y regulación de potencia en C.A.

En el circuito de la Figura 18.15 se muestra un sencillo ejemplo de aplicación de cómo se puede controlar la iluminación de una lámpara incandescente de gran potencia en C.A. Para ello, nos valemos de un triac, un diodo, una resistencia y un conmutador de tres posiciones. Cuando el conmutador S se sitúa en la posición 1, la lámpara permanece apagada, ya que la puerta del triac no ha sido activada. Para la posición 2 del conmutador, el terminal de puerta del triac recibe corriente a través del diodo, pero sólo en los semiciclos positivos, lo que provocará que el triac únicamente conduzca durante este período, dando como resultado una disminución de la potencia transferida a la lámpara. En la posición 3 del conmutador, a la puerta se le suministra corriente en los dos semiciclos, lo que provoca la conducción del triac tanto en los semiciclos positivos como en los negativos; en este caso la lámpara trabaja a plena potencia, suministrando una luminosidad máxima.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

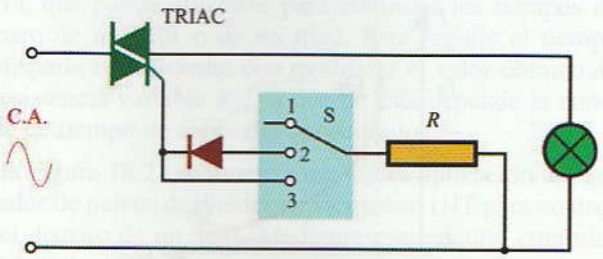


Figura 18.15. Circuito de control de potencia de una lámpara de C.A. mediante triac controlado por diac.

La misión de la resistencia R conectada en serie con el circuito de puerta es la de limitar la tensión y corriente de puerta a unos valores adecuados para su correcto funcionamiento.

Al igual que un diac puede utilizarse como elemento para controlar el disparo del SCR, es posible también hacerlo para controlar a un triac. En la Figura 18.16 se muestra el circuito de control de potencia de un horno en C.A. Regulando el valor de la resistencia variable R_2 conseguimos controlar el tiempo de carga del condensador C. Una vez alcanzada la tensión de ruptura del diac, el triac se dispara y conduce. El diac puede disparar el triac tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, con lo que se puede controlar la corriente por el triac en todo el ciclo completo. El resultado es que es posible controlar la potencia de la carga en un margen mucho más amplio que con el obtenido por el SCR.

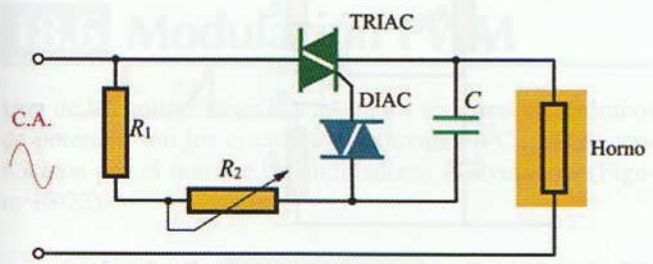


Figura 18.16. Circuito de control de potencia de una carga de C.A. mediante triac controlado por diac.

18.5 El transistor de unijuntura (UJT)

Este dispositivo se utiliza, fundamentalmente, como generador de pulsos de disparo para SCR y triacs.

El UJT es un componente que posee tres terminales: dos bases y un emisor, tal como se muestra en la Figura 18.17.

En la Figura 18.17(a), se puede apreciar la constitución de un UJT, que en realidad está compuesto solamente por dos

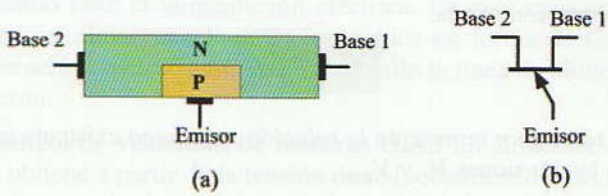


Figura 18.17. Transistor de unijuntura (UJT). (a) Constitución. (b) Representación esquemática.

cristales. Al cristal P se le contamina con una gran cantidad de impurezas, presentando en su estructura un número elevado de huecos. Sin embargo, al cristal N se le dopa con muy pocas impurezas, por lo que existen muy pocos electrones libres en su estructura. Esto hace que la resistencia entre las dos bases R_{BB} sea muy alta cuando el diodo del emisor no conduce. Para entender mejor cómo funciona este dispositivo, vamos a valernos del circuito equivalente de la Figura 18.18.

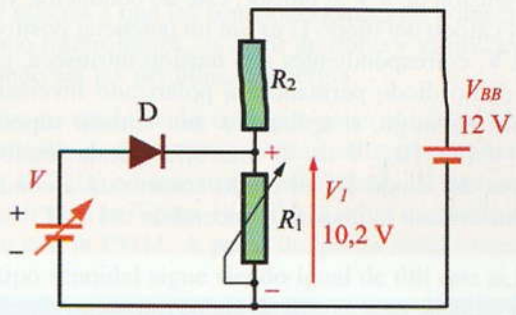


Figura 18.18. Circuito equivalente del UJT.

R_1 y R_2 equivalen a la resistencia de los tramos de cristal N comprendidos entre los terminales de las bases. El diodo D equivale a la unión formada por los cristales P-N entre el terminal del emisor y el cristal N.

Mientras el diodo del emisor no entre en conducción, la resistencia entre bases es igual a:

$$R_{BB} = R_1 + R_2$$

Si en estas condiciones aplicamos una tensión de alimentación V_{BB} entre las dos bases, la tensión que aparece entre el emisor y la base 1 será la que corresponda en el circuito equivalente a R_1; es decir, en el divisor de tensión se cumplirá que:

$$V_1 = R_1 \cdot \frac{V_{BB}}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{R_{BB}} \cdot V_{BB}$$

Si llamamos

$$\eta = \frac{R_1}{R_{BB}}$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

la ecuación queda:

$$V_1 = \eta V_{BB}$$

El término η representa la *relación intrínseca* existente entre las tensiones V_1 y V_{BB}.

Actividad Resuelta 18.1

Así, por ejemplo, si un UJT posee una relación intrínseca característica igual a 0,85 y queremos determinar la tensión que aparecerá entre el terminal de emisor y la base 1 al aplicar 12 V entre bases (véase la Figura 18.18), bastará con operar de la siguiente forma:

$$V_1 = \eta V_{BB} = 0{,}85 \cdot 12 = 10{,}2 \text{ V}$$

Al valor de V_1 se le conoce como tensión intrínseca, y es aquélla que hay que aplicar para que el diodo comience a conducir. En nuestro ejemplo, si aplicamos una tensión de 8 V al emisor, éste no conducirá, ya que en el cátodo del diodo D existe un potencial positivo de 10,2 V, correspondientes a la tensión intrínseca, por lo que dicho diodo permanecerá polarizado inversamente. Sin embargo, si aplicamos una tensión superior a 10,9 V (los 10,2 V de V_1 más 0,7 V de la tensión de barrera del diodo D), el diodo comenzará a conducir, produciéndose el disparo o encendido del UJT.

En resumen, para conseguir que el UJT entre en estado de conducción, es necesario aplicar al emisor una tensión superior a la intrínseca.

Una vez que conseguimos que el diodo conduzca, por efecto de una tensión de polarización directa del emisor respecto a la base 1, los portadores mayoritarios del cristal P (huecos) inundan el tramo de cristal de tipo N comprendido entre el emisor y dicha base (recuérdese que el cristal P está fuertemente contaminado con impurezas y el N débilmente). Este efecto produce una disminución repentina de la resistencia R_1 y con ella una reducción de la caída de tensión en la base 1 respecto del emisor, lo que hace que la corriente de emisor aumente considerablemente.

Mientras la corriente de emisor sea superior a la de mantenimiento (I_V), el diodo permanecerá en conducción como si de un candado se tratase. Esta corriente se especifica normalmente en las hojas de características y suele ser del orden de 5 mA.

En la Figura 18.19 se muestra el aspecto de una de las curvas características de un UJT. V_P (punto Q_1) nos indica la tensión pico que hay que aplicar al emisor para provocar el estado de encendido del UJT (recordar que $V_P = V_1 + 0{,}7$).

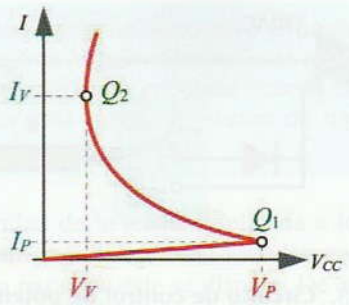


Figura 18.19. Curva característica del UJT.

Una vez superada esta tensión, la corriente del emisor aumenta (se hace mayor que I_P), provocándose el descebado del UJT cuando la corriente de mantenimiento es inferior a la de mantenimiento I_V (punto Q_2).

18.5.1. Aplicaciones del UJT

Una de las aplicaciones del UJT más común es como generador de pulsos en dientes de sierra. Estos pulsos resultan muy útiles para controlar el disparo de la puerta de triacs y SCR.

En la Figura 18.20 se muestra el esquema de uno de estos circuitos:

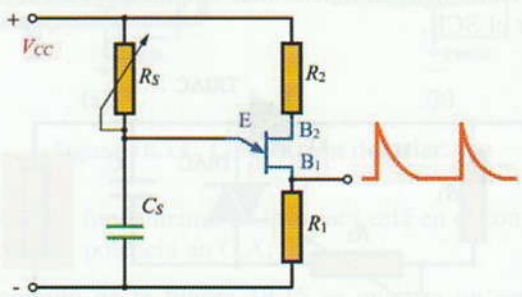


Figura 18.20. Generador de pulsos de dientes de sierra mediante UJT.

Su funcionamiento es como sigue: al aplicar una tensión V_{CC} al circuito serie R-C, formado por la resistencia variable R_S y el condensador C_S, éste comienza a cargarse. Como este condensador está conectado al emisor, cuando se supere la tensión intrínseca, el UJT entrará en conducción. Debido a que el valor óhmico de la resistencia R_1 es muy pequeño, el condensador se descargará rápidamente, y en el terminal de B_1 aparecerá un impulso de tensión. Al disminuir la corriente de descarga del condensador sobre el emisor del UJT, por debajo de la de mantenimiento, éste se desceba y comienza otro nuevo ciclo de carga y descarga del condensador. Así se consigue que en el terminal de la base 1 aparezca una señal pulsante en forma de dientes de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

sierra, que puede utilizarse para controlar los tiempos de disparo de un SCR o de un triac. Para regular el tiempo de disparo, es suficiente con modificar el valor óhmico de la resistencia variable R_S, ya que de ésta depende la constante de tiempo de carga del condensador.

En la Figura 18.21 se muestra una típica aplicación del generador de pulsos de dientes de sierra con UJT para controlar el disparo de un SCR. Mediante este circuito controlamos la velocidad de un motor en serie (o de cualquier otro tipo de carga: estufas, lámparas, etc.) gracias a la regulación de la corriente que realiza sobre medio ciclo el SCR. Para controlar la velocidad del motor, basta con modificar la frecuencia de los pulsos en dientes de sierra, lo cual se consigue variando el valor del potenciómetro R_S.

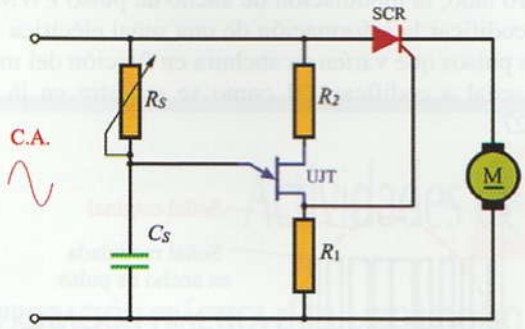


Figura 18.21. Control de velocidad de un motor mediante SCR y UJT.

18.6 Modulación PWM

Una de las aplicaciones típicas de los sistemas electrónicos de potencia son los circuitos de conversión C.C./C.A., conocidos por el nombre de onduladores o inversores (Figura 18.22).

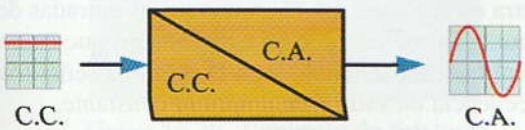


Figura 18.22. Un inversor convierte la C.C. en C.A.

Estos equipos son capaces de generar una corriente alterna a partir de una fuente de corriente continua. Son muy utilizados en:

Sistemas autónomos: Obtienen corriente alterna a partir de baterías, como por ejemplo en un sistema de energía solar fotovoltáica.

SAI: Sistemas de alimentación ininterrumpidas que alimentan equipos, como por ejemplo, un ordenador, aun cuando falle la alimentación eléctrica. En este caso unas baterías almacenan la energía eléctrica en forma de C.C. que será convertida a C.A. cuando falle la línea de alimentación.

Control de velocidad de motores C.A.: La alimentación se obtiene a partir de la tensión de red, obteniendo una etapa intermedia de corriente continua. A continuación se coloca el inversor que modificando la frecuencia consigue variar la velocidad del motor.

Existen diferentes formas para conseguirlo, una de las más corrientes es la modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*). Inicialmente, esta técnica se utilizaba casi exclusivamente para el control de potencia y velocidad de motores de corriente continua, pero en la actualidad se ha ido ampliando su campo de aplicación, por ejemplo, en las fuentes de alimentación conmutadas, inversores, etc. Con ella se ha conseguido realizar dispositivos de mayor rendimiento y menos voluminosos.

La modulación por ancho de pulso consigue un alto rendimiento gracias a que los semiconductores de potencia operan como interruptores, es decir en corte y saturación, minimizando así las pérdidas de energía.

Este tipo de modulación consigue generar una señal senoidal partiendo de una señal continua un tanto peculiar. En la Figura 18.23(a) se muestra la señal senoidal que se desea conseguir y en la Figura 18.23(b) la señal que realmente se obtiene con la PWM. A pesar de que la señal obtenida no es de tipo senoidal sigue siendo igual de útil que si lo fuese. Además posee la ventaja de que es muy fácil de regular su frecuencia.

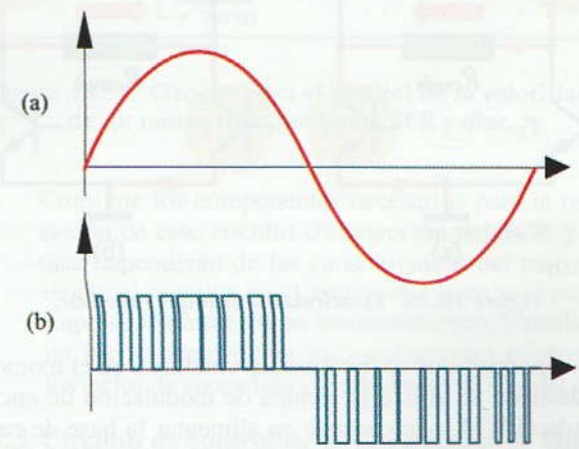


Figura 18.23. (a) Señal senoidal pura. (b) Señal modulada por ancho de pulso.

La base de este método consiste en generar un tren de pulsos de altura fija, pero con un ancho que sea proporcional a la amplitud o altura de la onda senoidal que se desea reproducir.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la Figura 18.24 se muestra el esquema básico de un inversor. Aquí se ha situado la carga o el receptor en medio de cuatro transistores de potencia alimentados con corriente continua.

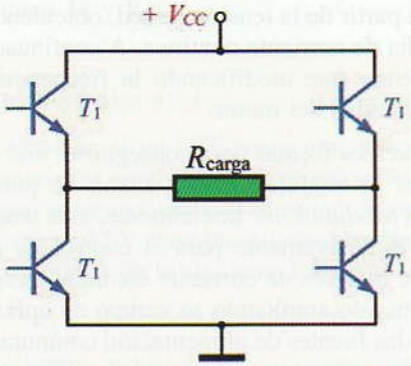


Figura 18.24. Esquema básico de un inversor.

Estos transistores se polarizan de tal forma que funcionen en corte o saturación. Dependiendo de la combinación de su conducción, la corriente que fluye por la carga tendrá una dirección u otra. Así, por ejemplo, si conducen el T_1 y el T_4, la corriente fluirá de izquierda a derecha [Figura 18.25(a)], mientras que si lo hacen el T_2 y el T_3 irá de derecha a izquierda [Figura 18.25b)].

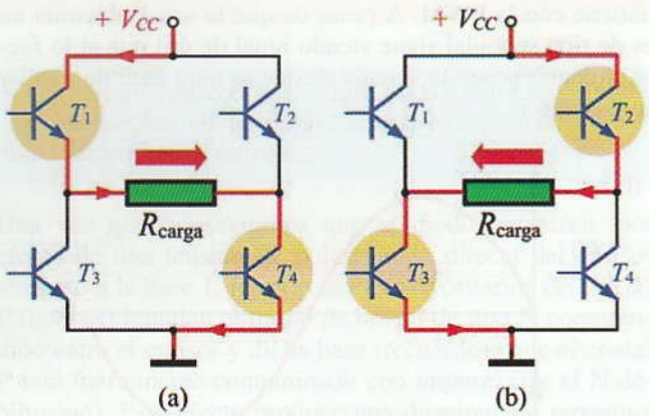


Figura 18.25. Funcionamiento del inversor.

Para conseguir que cada transistor conduzca en el momento adecuado se utiliza la técnica de modulación de ancho de pulso PWM, que consiste en alimentar la base de cada transistor con la salida de un comparador de tensión.

En las técnicas de codificación digital lo habitual para codificar una señal es modularla en amplitud; es decir, se toman muestras de la señal analógica cada cierto tiempo y la señal codificada es proporcional a su amplitud (valor de la tensión en un punto), tal como se muestra en la Figura 18.26.

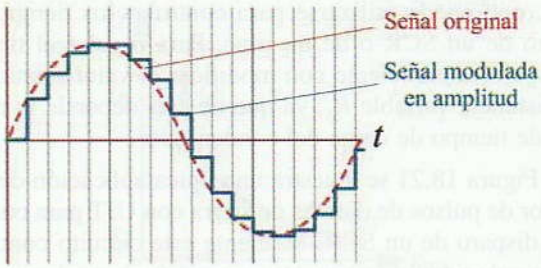


Figura 18.26. Señal modulada en amplitud.

Observa cómo la señal modulada en amplitud está formada por pulsos de anchura fija y de amplitud variable en función del muestreo de la señal original.

Por otro lado, la modulación de ancho de pulso PWM consigue codificar la información de una señal eléctrica variable, en pulsos que varíen su anchura en función del módulo de la señal a codificar, tal como se muestra en la Figura 18.27.

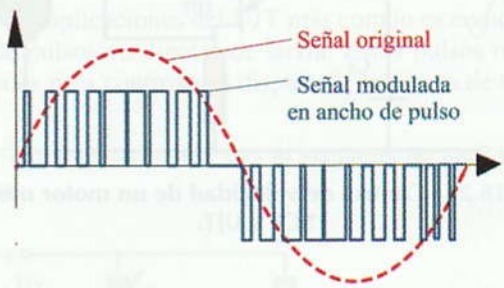


Figura 18.27. Señal modulada de ancho de pulso PWM.

Observa cómo en la señal modulada, la amplitud del pulso es fija y su anchura es mayor o menor en función de la amplitud de la señal original.

El circuito electrónico que es capaz de realizar la modulación PWM consiste en un comparador como el que se muestra en la Figura 18.28. A una de las entradas del comparador se introduce la señal a reproducir, que en un inversor será la señal senoidal, y en la otra una señal triangular de frecuencia elevada y de amplitud constante.

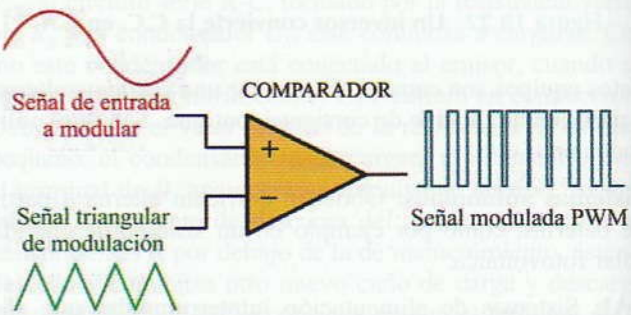


Figura 18.28. Modulación PWM mediante comparador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Este circuito compara las dos señales de entrada y proporciona a su salida una señal positiva, de tensión fija, cuando el valor de la tensión de la señal senoidal a reproducir (señal de entrada) sea superior a la tensión de la señal triangular (moduladora).

En la Figura 21.29 se muestra la modulación de una señal senoidal mediante una señal triangular de mayor frecuencia.

Como la señal cuadrada PWM está formada por una gran cantidad de frecuencias armónicas, es necesario utilizar un filtro adecuado, para eliminar éstas y obtener una señal con una única frecuencia.

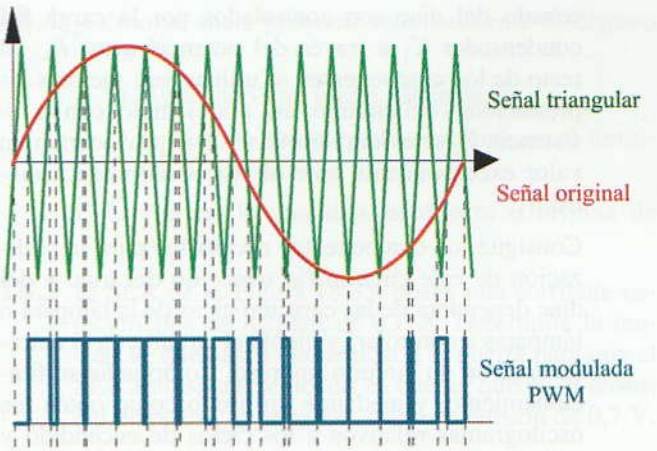


Figura 21.29. Modulación PWM con señal triangular.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

18.1 Identificación de tiristores. Consigue un SCR, un triac, un diac y un UJT, comprueba la disposición de sus terminales y consulta sus características en las hojas de especificaciones técnicas que facilita el fabricante de éstos.

Figura 18.30. Conjunto de tiristores.

18.2 Control de velocidad de motor mediante SCR y diac. En la Figura 18.31, se muestra el circuito para regular la velocidad de un motor serie en C.A. Mediante el potenciómetro R_2 controlamos el tiempo de carga del condensador C_2 conectado al diac. Al alcanzarse la tensión de disparo del diac, éste provoca el encendido del SCR durante uno de los semiciclos. El condensador C_1 y la bobina de reactancia L_1 se han incluido en el circuito para evitar interferencias en los aparatos de radio.

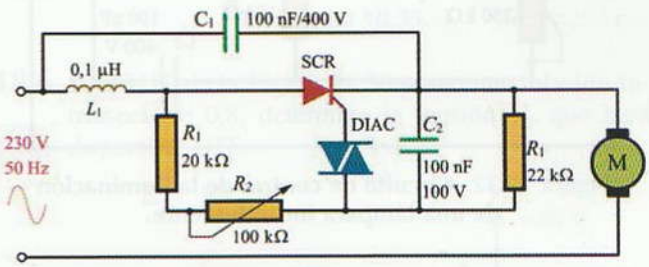


Figura 18.31. Circuito para el control de la velocidad de un motor serie mediante SCR y diac.

Consigue los componentes necesarios para la realización de este circuito (la selección del SCR y del diac dependerán de las características del motor) y monta el circuito en el entrenador o en un circuito impreso. Comprueba su funcionamiento, y mediante un osciloscopio obtén los oscilogramas relativos a los ciclos de encendido y apagado del SCR y del diac.

18.3 Circuito de control de la iluminación de lámparas incandescentes. En la Figura 18.32 se muestra el circuito completo para realizar el control de luminosidad de una o varias lámparas incandescentes. Al realizar este circuito con un triac, obtendremos un control total de la potencia entregada a la lámpara en todo el ciclo completo de C.A. El control del triac lo conseguimos gracias al diac. Los ciclos de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

cebado del diac son controlados por la carga del condensador C_1 a través del potenciómetro R_1. El resto de los componentes se utiliza para mejorar las prestaciones del circuito; así, por ejemplo, con la resistencia R_2 se evitan los efectos que provocarían un valor excesivamente bajo al ajustar el potenciómetro R_1.

Consigue los componentes necesarios para la realización de este circuito (la selección del triac y del diac dependerá de las características de la lámpara o lámparas a controlar) y monta el circuito en el entrenador o en un circuito impreso. Comprueba su funcionamiento, y mediante un osciloscopio obtén los oscilogramas relativos a los ciclos de encendido y apagado del triac y del diac.

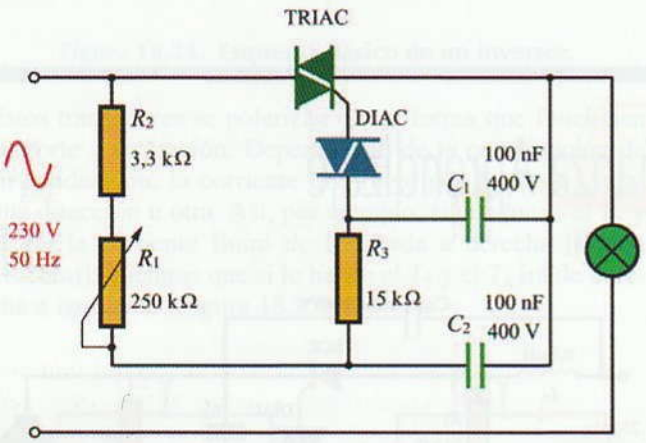


Figura 18.32. Circuito de control de la iluminación de una lámpara incandescente.

18.4 Relé estático mediante triac. Mediante el sencillo circuito de la Figura 18.33 podemos poner en marcha y parar un motor de C.A. El circuito trata de sustituir la acción de un relé o contactor electromagnético por medio de un triac. Al accionar el pulsador de marcha M, proporcionamos, a través de R_1, suficiente corriente a la puerta del triac, provocando el disparo del mismo. Al estar en estado de conducción el triac, la red formada por R_2 y C_1 es sometida a casi toda la tensión de alimentación, por lo que la corriente que aparece por dicha red queda desfasada prácticamente 90° respecto a dicha tensión. Debido a este desfase, esta corriente, que fluye a través del terminal de puerta, alcanza su valor máximo cuando la tensión es prácticamente nula, por lo que cada vez que el triac tiende a descebarse, dicha corriente provoca un nuevo disparo del triac, dando como resultado un encendido continuo del triac. Para desactivar el triac basta con accionar el pulsador de paro P, el cual elimina el auto-arranque del triac.

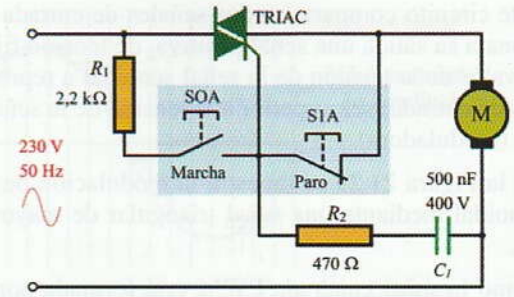


Figura 18.33. Circuito de relé mediante triac.

Como en otras ocasiones, consigue los componentes necesarios para la realización de este circuito (la selección dependerá de las características del motor) y monta el circuito en el entrenador o en un circuito impreso. Comprueba su funcionamiento.

18.5 Termostato electrónico. Se trata de diseñar un circuito que, aprovechando la sensibilidad de las resistencias NTC a los cambios de temperatura, pueda controlar el encendido y apagado de una estufa eléctrica, de tal forma que la temperatura ambiente de la estancia a calefactar se mantenga a una temperatura prefijada.

Para entender cómo actúa un termostato, estudiaremos el siguiente ejemplo:

En la Figura 18.34, se muestra el circuito de un termostato bimetálico que controla el encendido y apagado de una estufa.

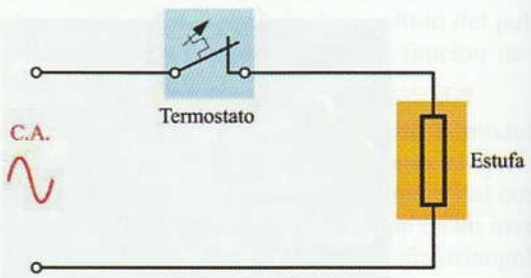


Figura 18.34. Circuito de control de una estufa mediante termostato.

Este termostato posee un contacto, a modo de interruptor, que se acciona por una lámina bimetálica. Esta lámina posee la propiedad de deformarse por un fenómeno de dilatación con los cambios de temperatura. Mientras la temperatura ambiente no sea superior a la fijada en el termostato, el contacto del mismo permanece cerrado y la estufa caldea el ambiente. Alcanzada la temperatura de referencia, el bimetal se deforma y el contacto se abre, interrum-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

piendo el funcionamiento de dicha estufa hasta que la temperatura ambiente vuelva a reducirse.

Diseña un circuito electrónico que sustituya la función del termostato bimetálico. Para ello, puedes utilizar transistores como elementos de amplificación de los cambios de resistencia de la NTC con la temperatura, un potenciómetro para ajustar la temperatura de referencia y relés o tiristores como elementos de accionamiento de potencia de la estufa.

Incluir un diodo LED, con su adecuada resistencia limitadora, con el fin de señalizar la puesta en marcha de la estufa.

Para el montaje de los componentes, será necesario el diseño de una placa de circuito impreso, donde se conectarán los mismos mediante soldadura.

Una vez encontrados los valores adecuados de los componentes necesarios para este termostato electrónico diseñada la placa del circuito impreso, monta y conecta las diferentes partes del circuito y comprueba su funcionamiento.

AUTOEVALUACIÓN

18.1 ¿Cómo se suele provocar habitualmente el disparo de los SCR?

A ❑ Aplicando una tensión directa disruptiva.

B ❑ Aplicando una pequeña corriente en el terminal de puerta.

C ❑ Aplicando una tensión inversa.

18.2 ¿Cuál es la diferencia entre un SCR y un triac?

A ❑ El SCR puede conducir en ambos sentidos, mientras que el triac sólo lo hace en uno.

B ❑ El triac se dispara por tensión directa elevada y el SCR por tensión inversa.

C ❑ El triac puede conducir en ambos sentidos, mientras que el SCR sólo lo hace en uno.

18.3 El SCR y el triac consiguen controlar la potencia de una carga.

A ❑ Modificando gradualmente la corriente de disparo.

B ❑ Controlando los tiempos de conducción y no-conducción.

C ❑ Modificando gradualmente la tensión directa.

18.4 ¿Cómo se suele provocar habitualmente el disparo de un diac?

A ❑ Aplicando una fuerte corriente.

B ❑ Aplicando una pequeña corriente en el terminal de puerta.

C ❑ Aplicando una tensión directa o inversa de ruptura.

18.5 El SCR de la Figura 18.35, posee una corriente característica de disparo de 0,1 A. Determina la tensión V_g que habrá que aplicar a la puerta para que el SCR se dispare, teniendo en cuenta que en el terminal de puerta aparece una caída de tensión de 0,7 V.

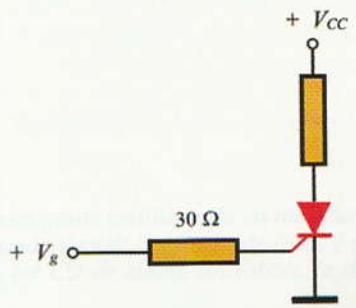


Figura 18.35.

18.6 Si el UJT de la Figura 18.36 posee una relación intrínseca de 0,8, determina la tensión V_P que hará disparar el UJT.

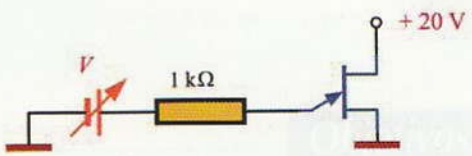


Figura 18.36.

AMPLIACIÓN

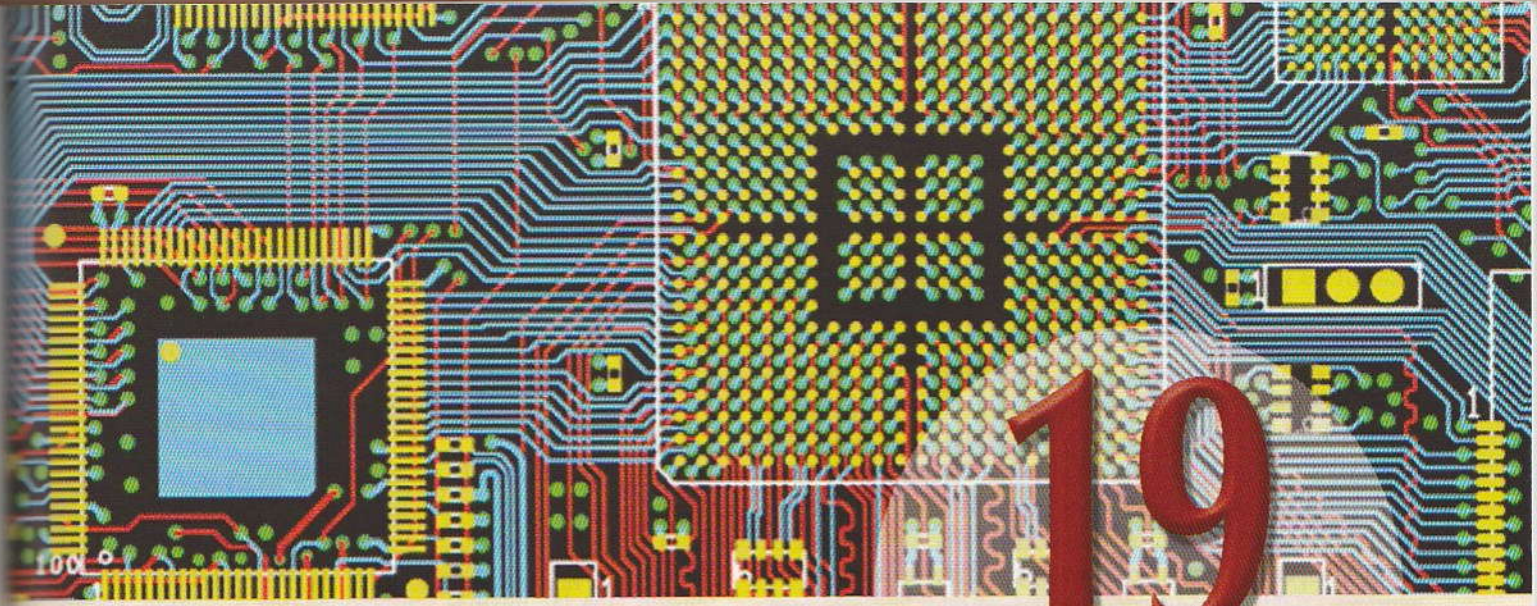
18.1 Consulta en Internet sobre los temas relacionados con esta unidad didáctica e intenta contrastar y ampliar la información obtenida. Además, estudia el funcionamiento y la composición de diferentes circuitos prácticos con tiristores que puedas encontrar en Internet.

18.2 Busca en Internet un fabricante de semiconductores de potencia y consigue las hojas de especificaciones técnicas de los mismos.

© Ediciones Paraninfo

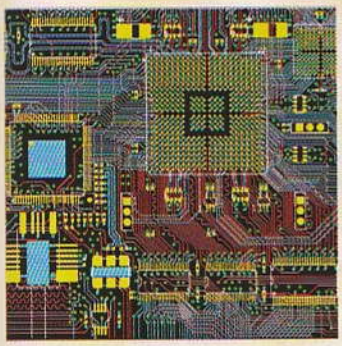
WWW.AUTODIDACTA.INFO

WWW.AUTODIDACTA.INFO



19

Introducción a la electrónica digital



La electrónica digital hoy en día avanza a grandes pasos sustituyendo en multitud de aplicaciones a la electrónica analógica. Hablamos del mundo digital: la cámara de fotos y de vídeo, el scanner, el ordenador, Internet, el móvil, el MP3, los CD de audio, los robots, la domótica, la automatización industrial, y un largo etcétera.

Contenido

19.1. Electrónica analógica y electrónica digital
19.2. Sistemas de numeración
19.3. Códigos
19.4. Niveles lógicos de las señales digitales
19.5. Puertas lógicas
19.6. Diseño de circuitos combinacionales con puertas lógicas
19.7. Construcción de puertas lógicas con circuitos integrados
19.8. Familias lógicas
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Operar con distintos sistemas de numeración y códigos, así como realizar sus conversiones.
- Diferenciar la electrónica analógica de la digital.
- Reconocer las ventajas de los sistemas digitales.
- Describir las funciones lógicas básicas mediante puertas.
- Analizar el funcionamiento de un circuito combinacional.
- Montar y analizar el funcionamiento de las puertas lógicas básicas.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

19.1 Electrónica analógica y electrónica digital

La electrónica es una disciplina que estudia los sistemas eléctricos desde el punto de vista del electrón (partícula que gira alrededor del átomo con carga eléctrica negativa). Mediante los componentes y circuitos electrónicos (diodos, transistores, condensadores, resistencias, amplificadores, osciladores, circuitos integrados, micropocesadores, memorias, etc.) es posible manejar a nuestro antojo el movimiento del electrón y conseguir múltiples aplicaciones, como por ejemplo: la radio, la televisión, los equipos de sonido, los ordenadores, los robots, la automatización industrial, los sistemas de control y gestión en el automóvil, los equipos de medida, etc.

La electrónica se puede dividir en dos grandes ramas:

- La electrónica analógica.
- La electrónica digital.

Figura 19.1. **La electrónica y sus aplicaciones.**

19.1.1. Señales analógicas

La **electrónica analógica** se fundamenta en el tratamiento y manejo de señales eléctricas de tipo analógico. Los fenómenos físicos que ocurren en nuestro entorno suelen variar de forma continua. Si tomamos como ejemplo un determinado sonido, éste irá tomando diferentes valores de intensidad sonora según transcurre el tiempo (véase Figura 19.2).

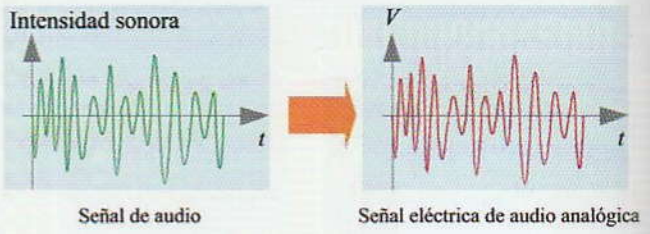


Figura 19.2. **Señal analógica.**

Mediante un micrófono es posible transformar dicha señal sonora en una pequeña señal eléctrica, donde el nivel de tensión siga las mismas variaciones que el sonido, según cambia su volumen y su frecuencia. La señal eléctrica así obtenida será ***análoga*** a la señal de audio original y se la conoce como *señal analógica* (véase Figura 19.3). De esta forma conseguimos imitar con señales eléctricas las señales del mundo real.

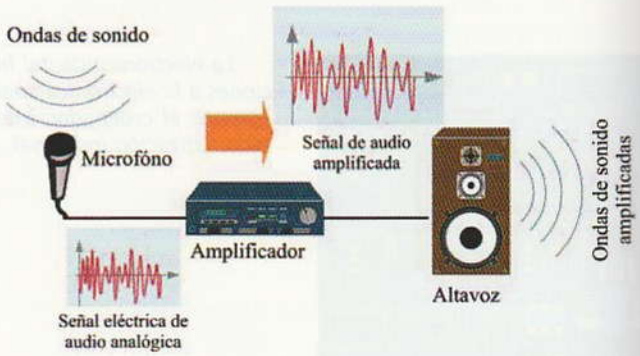


Figura 19.3. **Señal analógica obtenida al procesar una señal de audio con un micrófono.**

En la Figura 19.3 el sonido provoca la vibración de la membrana del micrófono, lo que hace que se genere una señal eléctrica analógica de muy poco nivel (en torno a unos pocos milivoltios); el amplificador de audio eleva dicho nivel (en torno a unos cuantos voltios) utilizando circuitos analógicos. La señal ya tiene suficiente nivel (volumen) para poder mover la membrana de un altavoz, donde obtenemos el sonido original captado por el micrófono pero con un volumen mucho mayor.

En conclusión se puede decir que una señal analógica es aquella que varía de forma continua, tal como lo hacen las magnitudes físicas en la naturaleza, como las variaciones del sonido, las de la luz, la de la temperatura, la presión, el tiempo, etc.

Las señales analógicas toman un valor instantáneo diferente para cada fracción del tiempo considerado. Dado que en un determinado intervalo de tiempo existen infinitos valores (los podemos tomar todo lo pequeños que queramos),

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

la señal eléctrica también alcanzará infinitos valores en dicho intervalo. De esta forma, podríamos afirmar que una señal eléctrica analógica reproduce de forma fiel la magnitud física de la que proviene.

19.1.2. Señales digitales

Otra forma de tratar las señales eléctricas que vamos a procesar es convertirlas en números. La **electrónica digital** se fundamenta en el tratamiento y manejo de señales eléctricas de tipo digital. Las señales digitales son mucho más simples que las analógicas, ya que la información se procesa y codifica en dos únicos estados, tal como se muestra en la Tabla 19.1.

Tabla 19.1. Estados de una señal digital.

1.er estado	2.º estado
1	0
Sí	No
Verdadero	Falso
Nivel alto de tensión	Nivel bajo de tensión
5 V	0 V
Interruptor cerrado	Interruptor abierto

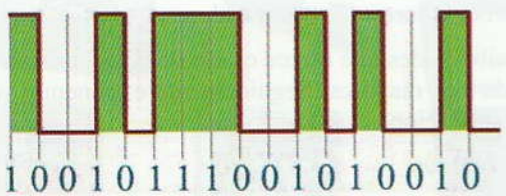


Figura 19.4. Señal digital compuesta por valores binarios de ceros y unos.

Estos dos estados se conocen como niveles lógicos y a cada uno se le asigna una cifra o *dígito*, el «1» y el «0»; lo que da lugar a las señales digitales o binarias.

El término digital se comenzó a configurar con la llegada del código Morse, pudiéndose considerar como el primer método de transmisión de señales en formato digital.

En comparación con una señal analógica que varía de forma continua, la señal digital sólo toma dos valores (uno y cero) en determinados intervalos de tiempo, por lo que se dice que toma un conjunto de valores discretos.

Así, por ejemplo, se podría digitalizar una señal eléctrica tomando su valor cada cierto tiempo (frecuencia de muestreo), a cada valor se le asigna una cifra digital en formato binario (cifras con unos y ceros). Este proceso se realiza con un conversor analógico digital (ADC), pudiéndose guardar dicha información en un soporte de tipo digital, como podría ser un disco óptico (DVD o CD-ROM), disco duro, tarjetas de memoria, etc. La información así guardada consiste en una secuencia enorme de cifras digitales en formato binario, es decir unos y ceros, que contienen de forma codificada la señal analógica original.

En el ejemplo de la Figura 19.5, el sonido está grabado en formato digital en un disco compacto (CD). El reproductor de CD lee los datos digitales gracias a un sistema óptico basado en diodos láser. La señal digital obtenida consiste en una serie de interrupciones (unos y ceros) que surgen a gran velocidad. Si aplicásemos esta señal directamente a un altavoz, oiríamos un sonido parecido al que produce un fax o un modem telefónico. Las señales físicas son analógicas, y por tanto si deseamos transferir el sonido en formato digital a un altavoz, hay que convertirlas previamente a formato analógico mediante un decodificador o un convertidor digital-analógico (DAC). A la salida del DAC obtenemos una señal analógica que se corresponde con la señal eléctrica original del sonido. Esta señal se amplifica y ya es posible escucharla en un altavoz a gran volumen.

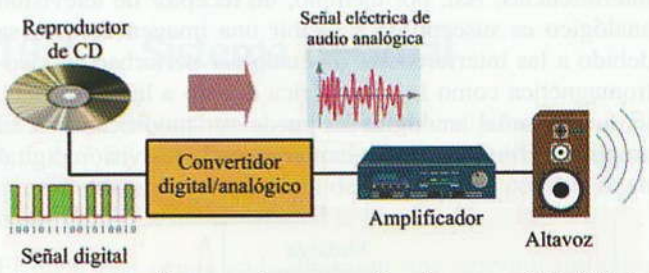


Figura 19.5. Proceso de conversión de una señal digital en una analógica.

La electrónica digital opera con números. La información está contenida en los números y no en la forma de la señal eléctrica. Una señal eléctrica siempre se puede convertir a números y, una vez procesada, recuperarse posteriormente.

En la Figura 19.6 se muestra el proceso de digitalización de una señal de audio. Para ello se somete a la señal a una medida de su valor cada cierto intervalo de tiempo (muestreo). Para una digitalización a 8 bits, se asigna a cada muestra un código de 8 dígitos en función del valor que toma la señal en la muestra, consiguiendo 256 permutaciones de unos y ceros, empezando por 00000000 y terminando con 11111111. El resultado final es una señal digital con una enorme cantidad de secuencias de cifras binarias

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

de 8 dígitos, que podremos almacenar en un soporte magnético (disco duro, tarjeta de memoria), óptico (CD-ROM, DVD), etc.

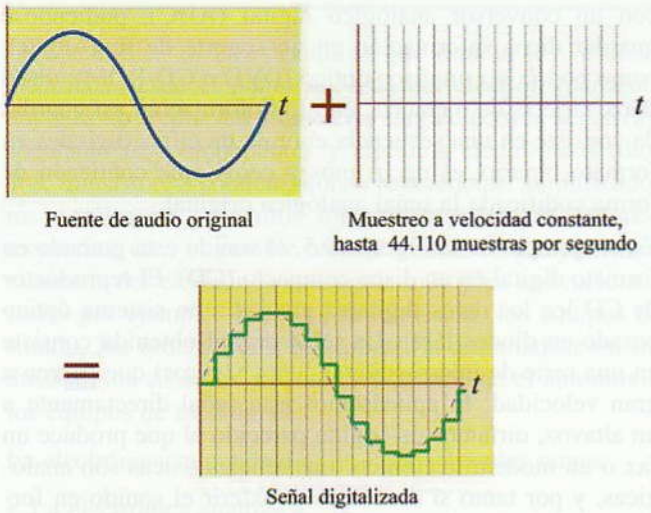


Figura 19.6. Proceso de digitalización de una señal.

La gran ventaja de los sistemas digitales frente a los analógicos es que las señales digitales se pueden almacenar, procesar y transmitir en forma de dígitos o cifras. Esta información es mucho más difícil que se perturbe mediante interferencias. Así, por ejemplo, un receptor de televisión analógico es susceptible a recibir una imagen defectuosa debido a las interferencias de cualquier perturbación electromagnética como la atmosférica debido a las tormentas, ya que la señal analógica se puede ver modificada en su amplitud o frecuencia. Sin embargo, en la televisión digital

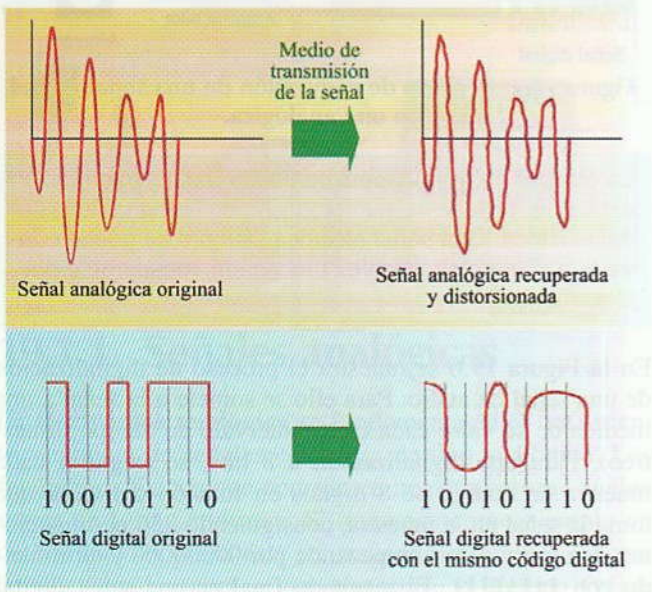


Figura 19.7. Distorsión de las señales analógica y digital.

(por ejemplo, la TDT), la señal que se transmite es una serie de cifras digitales formadas por unos y ceros (hay tensión, no hay tensión), y que aunque se modifique algo el valor de la tensión que se corresponde a un «1» o a un «0», la cifra no se modifica. Por decirlo de otra forma si yo digo el «1» en voz alta, seguirá también siendo un «1» en voz más baja, siempre y cuando se pueda oír. Por eso la televisión digital se suele ver bien, aunque existan pequeñas interferencias; cuando las interferencias aumentan, la imagen desaparece a intervalos de la pantalla.

Los circuitos digitales que se utilizan de forma repetitiva se pueden incluir o integrar en un solo componente o chip, pudiendo aportar muchas funciones en un espacio muy reducido y a un coste muy bajo. Además, los sistemas digitales pueden ser programables, lo que permite reconfigurar un mismo circuito de forma rápida sólo con cambiar el programa.

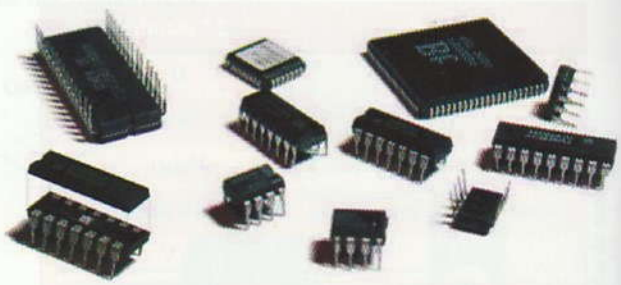


Figura 19.8. Circuitos integrados.

Gracias a la electrónica digital, que opera con cifras binarias, se pueden realizar operaciones lógicas y aritméticas, que es la base para la construcción de autómatas, de los microprocesadores y los ordenadores.

Las posibilidades que ofrece el uso de la electrónica digital son cada vez mayores. Seguidamente exponemos algunas de sus aplicaciones:

- Calculadoras.
- Ordenadores.
- Escáner.
- Automatización industrial y doméstica.
- Electrónica del automóvil.
- Telefonía móvil.
- Audio (MP3, CD, Mini Disc, etc.).
- Televisión digital.
- Fotografía digital.
- Telecomunicaciones.
- Internet.
- Instrumentos de medida.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tabla 19.2. Ventajas de la electrónica digital frente a la analógica.

Circuitos digitales	Circuitos analógicos
Siempre reproducen exactamente los mismos resultados.	La salida puede variar con la temperatura, la tensión de alimentación, estado de los componentes, etc.
El diseño de circuitos lógicos es sencillo.	Para diseñar circuitos hay que realizar operaciones complejas y conocer muy bien sus componentes.
Se pueden programar para hacer que un mismo circuito pueda ser utilizado para varias funciones.	Los circuitos sólo realizan la función para la que han sido diseñados.
Mayor facilidad de integración para circuitos repetitivos.	Coste más elevado de los circuitos.
Menor posibilidad de interferencias en las señales digitales.	Susceptible de sufrir interferencias de otros sistemas.
Facilidad de almacenamiento de la información en soporte magnético u óptico sin deterioro de la fidelidad de la señal, aunque se realicen muchas copias.	La información almacenada se va deteriorando, sobre todo si se realizan copias.

Figura 19.9. La electrónica digital ofrece múltiples aplicaciones.

19.2 Sistemas de numeración

El sistema de numeración que mejor se adapta a la codificación de señales digitales es el binario, ya que solamente usa dos dígitos, el uno y el cero, para formar las diferentes cifras. En este apartado también estudiaremos el sistema de numeración octal, el hexadecimal, el BCD y sus diferentes conversiones al sistema que utilizamos habitualmente, el sistema decimal.

Un **sistema numérico** es el conjunto ordenado de símbolos o dígitos y las reglas con que se combinan para representar cantidades numéricas. Existen diferentes sistemas numéricos, cada uno de ellos se identifica por su base.

Un **dígito** en un sistema numérico es un símbolo que no es combinación de otros y que representa un entero positivo.

Un **bit** es un dígito binario (abreviación del inglés *binary digit*), es decir, un 0 o un 1.

La **base** de un sistema numérico es el número de dígitos diferentes usados en ese sistema.

Tabla 19.3. Sistemas de numeración.

Sistema	Base	Dígitos
Binario	2	0, 1
Octal	8	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
Decimal	10	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
Hexadecimal	16	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F

19.2.1. Sistema decimal

El sistema decimal tiene su base en diez dígitos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9. El número de dígitos o símbolos diferentes que se utilizan en un sistema de numeración constituye su **base**. Para el sistema decimal la base es **10**.

El lugar que ocupa cada dígito en una determinada cifra nos indica su valor. Así, por ejemplo el 956_{10} se puede descomponer de la siguiente forma:

$$956_{10} = 900 + 50 + 6 = 9 \cdot 100 + 5 \cdot 10 + 6 \cdot 1$$

Otra forma de expresarlo sería en forma polinómica:

$$956_{10} = 9 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^1 + 6 \cdot 10^0$$

En conclusión, la cifra se descompone multiplicando cada dígito por su base elevada al número que representa la posición que ocupa. De forma general, la expresión polinómica exponencial de un número (N) en el sistema decimal sería la siguiente:

$$N_{10} = a_n \cdots a_2 a_1 a_0 = a_n \cdot 10^n + \cdots + a_2 \cdot 10^2 + a_1 \cdot 10^1 + a_0 \cdot 10^0$$

Los términos $a_n \cdots a_2 a_1 a_0$ son los dígitos del número (del 0 al 9 en el sistema decimal).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

19.2.2. Sistema binario

El sistema binario tiene su base en dos únicos dígitos: 0 y 1. Su expresión polínomica sería:

$$N_2 = a_n \cdots a_2 a_1 a_0 = a_n \cdot 2^n + \cdots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0$$

Los términos $a_n \cdots a_2 a_1 a_0$ son los dígitos del número (del 0 al 1 en el sistema binario).

Figura 19.10. Valores de las posiciones de los términos binarios de un número de 8 bits.

Actividad resuelta 19.1

¿Cuál es el valor decimal del número binario 11001_2?

Solución: Aplicamos la expresión polinómica:

$$11001_2 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 =$$
$$1 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 25_{10}$$

Para convertir un número decimal a binario se realiza la división continuada por 2 hasta que el cociente sea cero. Los restos obtenidos en los diferentes pasos nos darán el número en binario. Para ello se toman los dígitos obtenidos en los restos desde el último hasta el primero.

Actividad resuelta 19.2

¿Cuál es el valor binario del número decimal 25_{10}?

Solución:

División	Cociente	Resto
25 : 2 =	12	1
12 : 2 =	6	0
6 : 2 =	3	0
3 : 2 =	1	1
1 : 2 =	0	1

→ 1 1 0 0 1

Actividad propuesta 19.1

Convierte los siguientes números decimales a binarios:

a) 48_{10}; **b)** 375_{10}; **c)** 4.356_{10}

Convierte los siguientes números binarios a decimales:

d) 11101001_2; **e)** 101010011_2;

f) 1100110010_2

*** En www.paraninfo.es podrás consultar la solución a esta Actividad propuesta.*

19.2.3. Sistema octal y hexadecimal

El sistema octal (base 8) y hexadecimal (base 16) se pueden considerar como *«binario abreviado»*, ya que la conversión de éstos a binario y viceversa es prácticamente inmediata a simple vista, por lo que han sido utilizados para representar de manera compacta información binaria en los sistemas digitales.

Sistema octal

La conversión de un número octal en un número binario se realiza de forma sencilla e inmediata, para ello hay que sustituir cada dígito octal por la cadena equivalente de tres bits binarios, tal como se muestra en la Tabla 19.4

Tabla 19.4. Correspondencias entre números octales y cadenas de tres bits binarios.

$Octal_{(8)}$	$Binario_{(2)}$
0	0 0 0
1	0 0 1
2	0 1 0
3	0 1 1
4	1 0 0
5	1 0 1
6	1 1 0
7	1 1 1

Actividad resuelta 19.3

¿Cuál es el número binario del número octal 457_8?

Solución: Consultando en la Tabla 19.4 de equivalencias

Octal	Binario
4	100
5	101
7	111

457_8 → 100 101 111_2

Actividad resuelta 19.4

¿Cuál es el número octal del número binario 1010111_2?

Solución: Se agrupan los bits de tres en tres comenzando por el bit menos significativo. Como en nuestro ejemplo el número de bits no es múltiplo de tres, se añaden a la izquierda del bit más significativo lo ceros necesarios para completar un grupo de tres.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Sistema hexadecimal

El código hexadecimal posee una base 16 y consta de 10 dígitos numéricos y 5 alfabéticos. En la Tabla 19.5 se muestran las equivalencias entre los diferentes códigos de numeración

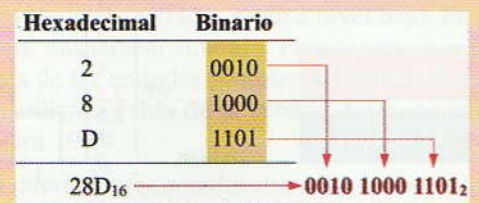
Tabla 19.5. Correspondencias entre números hexadecimales y cadenas de cuatro bits binarios.

$Decimal_{(10)}$	$Hexadecimal_{(16)}$	$Binario_{(2)}$
0	0	0 0 0 0
1	1	0 0 0 1
2	2	0 0 1 0
3	3	0 0 1 1
4	4	0 1 0 0
5	5	0 1 0 1
6	6	0 1 1 0
7	7	0 1 1 1
8	8	1 0 0 0
9	9	1 0 0 1
10	A	1 0 1 0
11	B	1 0 1 1
12	C	1 1 0 0
13	D	1 1 0 1
14	E	1 1 1 0
15	F	1 1 1 1

Actividad resuelta 19.5

¿Cuál es el número binario del número hexadecimal $28D_{16}$?

Solución: Consultando en la Tabla 19.5 de equivalencias



Actividad resuelta 19.6

¿Cuál es el número hexadecimal del número binario 10110100100_2?

Solución: Se agrupan los bits de cuatro en cuatro comenzando por el bit menos significativo. Como en nuestro ejemplo el número de bits no es múltiplo de cuatro, se añaden a la izquierda del bit más significativo los ceros necesarios para completar un grupo de cuatro.

Actividad propuesta 19.2

Convierte los siguientes números en código binario:

a) 4785_{10} **b)** 238_{10}

c) 345_8 **d)** 236_8

e) $45B_{16}$ **f)** $675D_{16}$

Convierte los siguientes números binarios en código decimal, octal y hexadecimal:

g) 1100010 **h)** 101010101010

*** En www.paraninfo.es podrás consultar la solución a esta Actividad propuesta.*

19.3 Códigos

La información que han de procesar los sistemas digitales debe adaptarse lo mejor posible a la forma de trabajar de los mismos, por lo que en la práctica se recurre a formas diferentes de representar la información de todo tipo (codificar) utilizando combinaciones de unos y ceros. Seguidamente estudiaremos algunos de los códigos de más uso en la electrónica digital.

19.3.1. Código BCD natural

El código BCD natural consiste en representar cada uno de los dígitos decimales por su binario equivalente expresado con 4 bits, tal como se muestra en la Tabla 19.6.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tabla 19.6. Equivalencias código BCD.

$Decimal_{(10)}$	BCD natural
0	0 0 0 0
1	0 0 0 1
2	0 0 1 0
3	0 0 1 1
4	0 1 0 0
5	0 1 0 1
6	0 1 1 0
7	0 1 1 1
8	1 0 0 0
9	1 0 0 1

Actividad resuelta 19.7

a) Convierte el número 928_{10} en BCD.

Solución: $928_{10} = 1001\ 0010\ 1000_{BCD}$

b) Convierte el número 100001110011_{BCD} en decimal.

Solución: $1000\ 0111\ 0011_{BCD} = 873_{10}$

19.3.2. Código ASCII

El código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) es un código alfanumérico que utiliza 7 bit para codificar números, letras, símbolos especiales e instrucciones de control para periféricos. Es el código más utilizado en los teclados de los ordenadores.

Así, por ejemplo, la palabra «Hola» se presenta en código ASCII de la siguiente forma:

H	o	l	a
1001000	1101111	1101100	1100001

En www.paraninfo.es podrás consultar las equivalencias del código ASCII.

Actividad propuesta 19.3

Encuentra el significado de la siguiente expresión codificada en ASCII:

1000010 1001001 1000101 1001110

***En www.paraninfo.es podrás consultar la solución a esta Actividad propuesta.*

Otros códigos utilizados en los sistemas digitales son también:

- ASCII extendido de 8 bits.
- Gray.
- BCD Aiken 241.
- BCD Aiken 541.
- Johnson.
- Hamming.

Actividad propuesta 19.4

Busca en Internet información relativa a otros códigos.

19.4 Niveles lógicos de las señales digitales

La electrónica digital trabaja con circuitos que sólo contemplan dos estados posibles, verdadero o falso, sí o no, que se representan por la cifras binarias «1» y «0». La forma de convertir esta información en impulsos eléctricos es asignar a cada uno de estos dos estados, o niveles lógicos, una cierta tensión eléctrica. A este respecto, se pueden aplicar dos tipos de lógica:

- **Lógica positiva:** El «1» equivale a una tensión de nivel alto (**H**igh) y el «0» a una tensión de nivel bajo (**L**ow) (Figura 19.11).
- **Lógica negativa:** El «1» equivale a una tensión de nivel bajo (**L**ow) y el «0» a una tensión de nivel alto (**H**igh) (Figura 19.12).

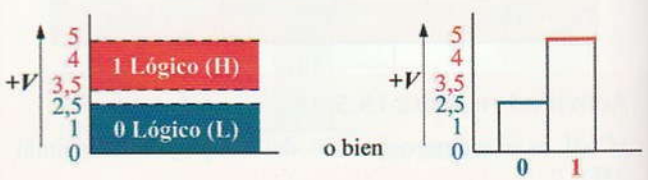


Figura 19.11. Lógica positiva.

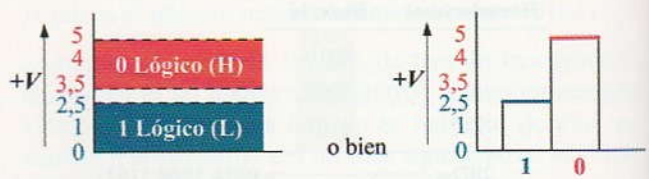


Figura 19.12. Lógica negativa.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La forma más sencilla de representar los dos niveles lógicos es como la que se muestra en la Figura 19.13.

Figura 19.13. Niveles lógicos de una señal digital.

La lógica que utilizaremos en los circuitos de este texto será habitualmente la positiva, aunque en la práctica se utilizará la lógica que mejor se adapte al diseño.

19.5 Puertas lógicas

El origen de los circuitos lógicos comienza con la necesidad de construir automatismos y es anterior al desarrollo de la electrónica digital integrada. Una de las primeras aplicaciones fue la sustitución de los relés electromagnéticos, que ocupaban un gran volumen y requerían de operaciones de mantenimiento constantes, por puertas lógicas integradas en un solo «chip», en las centrales telefónicas.

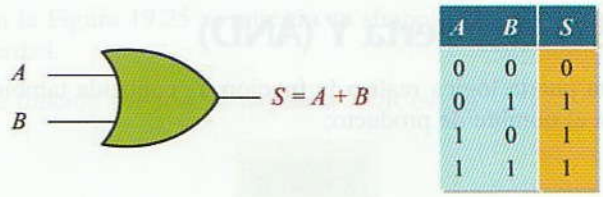
Los componentes básicos que se utilizan en la electrónica digital para realizar las diferentes funciones elementales reciben el nombre de puertas lógicas. Las puertas lógicas se consiguen gracias a los circuitos integrados, y constan de diferentes entradas y de una salida. A las entradas de las mismas se les aplica uno de los dos niveles lógicos: «1» o «0», y en función del tipo de puerta utilizada, obtendremos a la salida uno de dichos niveles lógicos.

En este apartado estudiaremos los **circuitos combinacionales**, donde las salidas dependen directamente del valor de las entradas, y no pueden por tanto almacenar ningún tipo de información, sólo realizan transformaciones en las entradas. Más adelante estudiaremos **los circuitos secuenciales**, que son capaces de «recordar» números que han recibido anteriormente.

19.5.1. Puerta O (OR)

Es una puerta lógica de varias entradas. Para el caso de dos entradas, la salida obtenida es de nivel alto si cualquiera de sus entradas o ambas están a nivel alto, y su salida será de nivel bajo si ambas entradas están a nivel bajo. En la Figura 19.14 se muestra su símbolo. Para representar las combinaciones de las entradas posibles y el nivel obtenido a la salida se utiliza la **tabla de la verdad**, tal como se muestra en la Figura 19.14.

Para una puerta lógica con dos entradas, las combinaciones que se pueden conseguir en la tabla de la verdad son: $2^2 = 4$.



A	B	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Figura 19.14. Puerta lógica OR y su tabla de la verdad.

Esta puerta lógica realiza la función «O», conocida también con el nombre de suma:

$$S = A + B$$

Desde el punto de vista de la lógica, esta función se puede interpretar así:

- La salida S será verdadera cuando cualquiera de las entradas A o B lo sea.

Para entender mejor estos conceptos, podemos realizar una simulación de esta puerta lógica utilizando interruptores, tal como se muestra en la Figura 19.15, de tal forma que:

- Un interruptor abierto se corresponde como un nivel de entrada bajo = 0.
- Un interruptor cerrado equivale a un nivel de entrada alto = 1.

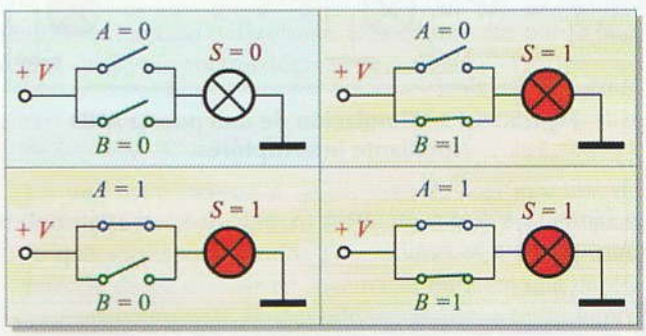


Figura 19.15. Simulación de una puerta OR mediante interruptores.

La lámpara se enciende ($S = 1$) si se cierra cualquiera de los dos interruptores, o ambos.

Actividad propuesta 19.5

Dibuja el símbolo de una puerta OR con tres entradas y escribe su tabla de la verdad.

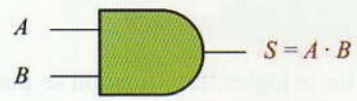
WWW.AUTODIDACTA.INFO

19.5.2. Puerta Y (AND)

Esta puerta lógica realiza la función Y, conocida también con el nombre de producto:

$$S = A \cdot B$$

Para el caso de dos entradas, la salida obtenida es de nivel alto sólo si ambas entradas están a nivel alto. En la Figura 19.16 se muestra su símbolo y su tabla de la verdad.



A	B	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Figura 19.16. Puerta lógica AND y su tabla de la verdad.

En la Figura 19.17 se muestra una simulación de esta puerta lógica utilizando interruptores.

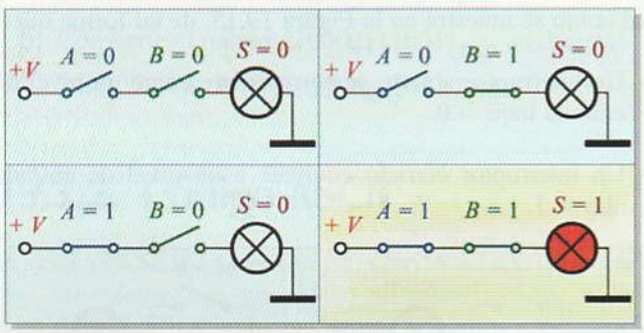


Figura 19.17. Simulación de una puerta AND mediante interruptores.

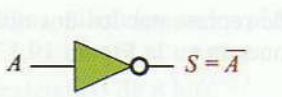
La lámpara sólo se enciende ($S = 1$) si se cierran ambos interruptores a la vez.

Actividad propuesta 19.6

Dibuja el símbolo de una puerta AND con cuatro entradas y escribe su tabla de la verdad.

19.5.3. Puerta inversora NOT

Es una puerta lógica de una sola entrada. La salida obtenida es siempre el inverso al nivel lógico de la entrada, es decir convertir unos a ceros y ceros a unos. En la Figura 19.18 se muestra su símbolo y su tabla de la verdad.



A	S
0	1
1	0

Figura 19.18. Puerta lógica NOT y su tabla de la verdad.

La función que realiza la puerta NOT es:

$$S = \overline{A}$$

19.5.4. Puerta NO O (NOR)

La puerta NOR, desde un punto de vista funcional, está formada por una puerta OR y una puerta NOT, tal como se muestra en la Figura 19.19.

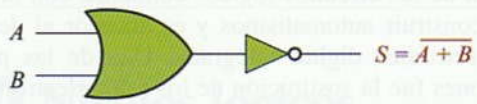
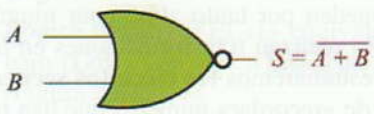


Figura 19.19. Puerta NOR mediante combinación de puerta OR y puerta NOT.

Su funcionamiento es el **inverso** de la puerta NOR. Para el caso de dos entradas, la salida obtenida es de nivel alto sólo si ambas entradas están a nivel bajo. En la Figura 19.20 se muestra su símbolo y su tabla de la verdad.

La función que realiza la puerta NOR es:

$$S = \overline{A + B}$$



A	B	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Figura 19.20. Puerta lógica NOR y su tabla de la verdad.

19.5.5. Puerta NO Y (NAND)

La puerta NAND funcionalmente está formada por una puerta AND y una puerta NOT, tal como se muestra en la Figura 19.21.

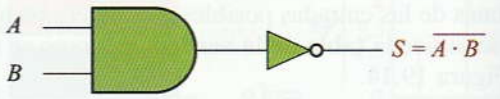


Figura 19.21. Puerta NAND mediante combinación de puerta AND y puerta NOT.

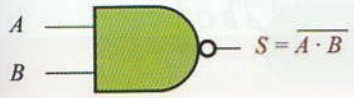
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Su funcionamiento es el **inverso** de la puerta NAND. Para el caso de dos entradas, la salida obtenida es de nivel alto sólo si alguna de las entradas está a nivel alto o ambas a la vez. En la Figura 19.22 se muestra su símbolo y su tabla de la verdad.

La función que realiza la puerta NAND es:

$$S = \overline{A \cdot B}$$



A	B	S
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

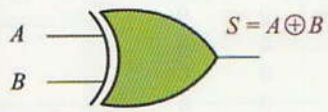
Figura 19.22. Puerta lógica NAND y su tabla de la verdad.

19.5.6. Puerta O exclusiva (XOR)

La salida obtenida en una puerta XOR es de nivel alto sólo cuando lo sea **exclusivamente** alguna de sus entradas. En la Figura 19.23 se muestra su símbolo y su tabla de la verdad.

La función que realiza la puerta XOR es:

$$S = A \oplus B$$



A	B	S
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 19.23. Puerta lógica XOR y su tabla de la verdad.

19.5.7. Puerta NO XOR (XNOR)

La puerta XNOR funcionalmente está formada por una puerta XOR y una puerta NOT, tal como se muestra en la Figura 19.24.

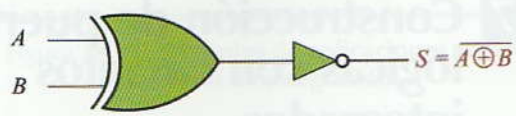


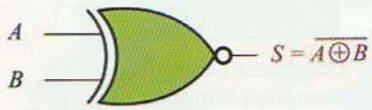
Figura 19.24. Puerta XNOR mediante combinación de puerta XOR y puerta NOT.

Su funcionamiento es el **inverso** de la puerta XOR. La salida obtenida es de nivel alto si ambas entradas son iguales.

En la Figura 19.25 se muestra su símbolo y su tabla de la verdad.

La función que realiza la puerta XOR es:

$$S = \overline{A \oplus B}$$



A	B	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Figura 19.25. Puerta lógica XNOR y su tabla de la verdad.

19.6 Diseño de circuitos combinacionales con puertas lógicas

Con la combinación de diferentes puertas lógicas se puede conseguir dar respuesta a una determinada aplicación práctica. Para ello, lo primero es definir el número de entradas y establecer las asociaciones de las señales de entrada con la salida. Esto se lleva a cabo con la ayuda de la tabla de la verdad, de la que se obtiene la función que se corresponde con la salida. Una vez obtenida dicha función, ya se puede realizar el circuito o *diagrama lógico* formado por la interconexión de las puertas lógicas necesarias.

Actividad resuelta 19.8

En una nave industrial se dispone de tres motores de las siguientes potencias: 10 kW, 20 kW y 30 kW, para lo que se dispone de dos generadores de 30 kW cada uno. Se desea diseñar un sistema automático que ponga en funcionamiento el segundo generador cuando la potencia de los motores supere los 30 kW suministrados por el primer generador.

En la Figura 19.26 se muestra un diagrama esquemático de la posible solución. A cada uno de los motores se les ha instalado unos sensores (A, B y C) que se cerrarán, dando lugar a un «1» lógico, cuando entren en funcionamiento los respectivos motores. El circuito digital dará una salida de nivel alto «1» y activará el generador número 2, cuando la combinación de los sensores A, B, C, correspondientes a las entradas, cumplan la condición dada (la suma de la potencia de los motores conectados supere los 30 kW).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

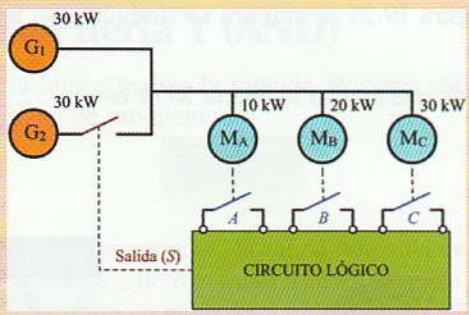


Figura 19.26. **Diagrama esquemático de automatización.**

Con esta información ya estamos en disposición de realizar la tabla de la verdad que cumpla con las condiciones dadas en el diseño (véase Figura 19.27). Como las entradas son 3, el número de combinaciones posibles será: $2^3 = 8$.

A B C	S	
0 0 0	0	
0 0 1	0	
0 1 0	0	
0 1 1	1	$\overline{A}BC$
1 0 0	0	
1 0 1	1	$A\overline{B}C$
1 1 0	0	
1 1 1	1	ABC

Figura 19.27. **Tabla de la verdad.**

Si ahora tomamos solamente los valores de la salida que han dado como resultado un «1» lógico, podremos escribir la función que deberá realizar nuestro circuito lógico combinacional.

$$S = \overline{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \overline{B} \cdot C + A \cdot B \cdot C$$

Ahora ya podemos construir nuestro circuito mediante las puertas lógicas que ya conocemos, de tal forma que se cumplan las condiciones de la función anterior. En la Figura 19.28 se muestra la solución a nuestro sistema de automatización.

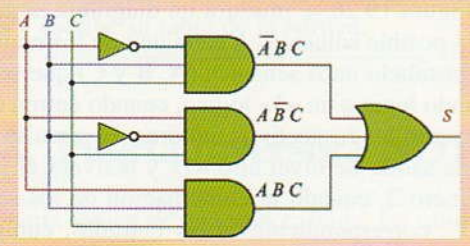


Figura 19.28. **Diagrama lógico para la automatización del generador.**

Actividad resuelta 19.9

Obtén la función y la tabla de la verdad del diagrama lógico de la Figura 19.29.

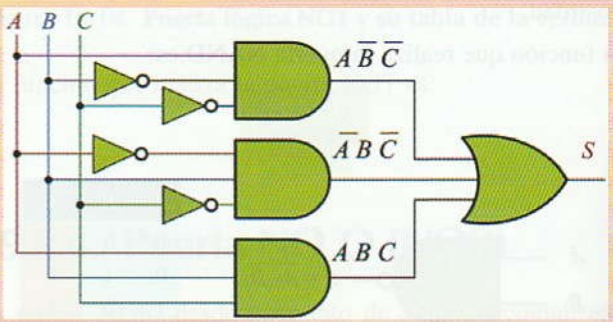


Figura 19.29. **Diagrama lógico.**

Solución: Al observar la función que realiza cada puerta lógica individual obtenemos la función que se corresponde con la salida:

$$S = A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} + \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C} + A \cdot B \cdot C$$

Para realizar la tabla de la verdad de forma más sencilla, situaremos los términos parciales de la función con las salidas obtenidas en las diferentes puertas lógicas, tal como se muestra en la Figura 19.30.

A B C	$A\overline{B}\overline{C}$	$\overline{A}B\overline{C}$	ABC	S
0 0 0	0	0	0	0
0 0 1	0	0	0	0
0 1 0	0	1	0	1
0 1 1	0	0	0	0
1 0 0	1	0	0	1
1 0 1	0	0	0	0
1 1 0	0	0	0	0
1 1 1	0	0	1	1

Figura 19.30. **Tabla de la verdad.**

Como ya estudiaremos en la siguiente unidad didáctica, con el conocimiento del álgebra de Boole y de sistemas de simplificación, se puede conseguir realizar circuitos lógicos con el menor número de puertas posibles, e incluso realizarlos con un solo tipo de puerta lógica.

19.7 Construcción de puertas lógicas con circuitos integrados

Para la fabricación de las puertas lógicas se utilizan los **circuitos integrados** (CI). Éstos están formados por un conjunto de componentes electrónicos (resistencias, dio-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

dos, transistores) integrados en una sola pieza de material semiconductor a base de silicio e insertada en el interior de un encapsulado.

Los circuitos integrados han ido evolucionando con el tiempo, consiguiéndose integrar cada vez un mayor número de puertas lógicas en un solo componente o **CI**. En la Tabla 19.7 se muestra una clasificación de los circuitos integrados en función de su escala de integración.

Tabla 19.7. Escala de integración de los circuitos integrados.

Escala de integración	N.º de puertas
SSI - Integración a pequeña escala	Menos de 12
MSI - Integración a media escala	12 a 99
LSI - Integración a gran escala	100 a 9.999
VLSI - Integración a escala muy grande	10.000 a 99.999
ULSI - Integración a escala ultragrande	100.000 a 999.999
GSI - Integración a gigaescala	1.000.000 o más

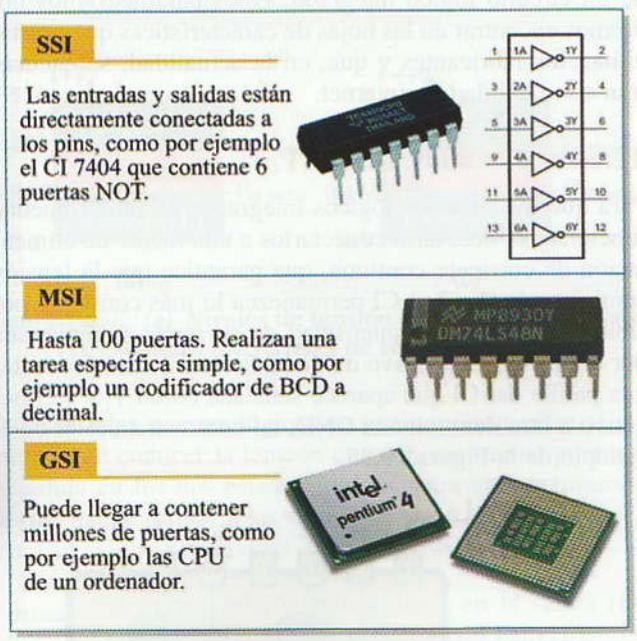


Figura 19.31. Ejemplos de aplicaciones según la escala de integración.

Los circuitos integrados se fabrican con diferentes encapsulados dependiendo de la forma de conexión al circuito de sus terminales o patillas. En la Figura 19.32 se muestra el aspecto físico de diferentes encapsulados.

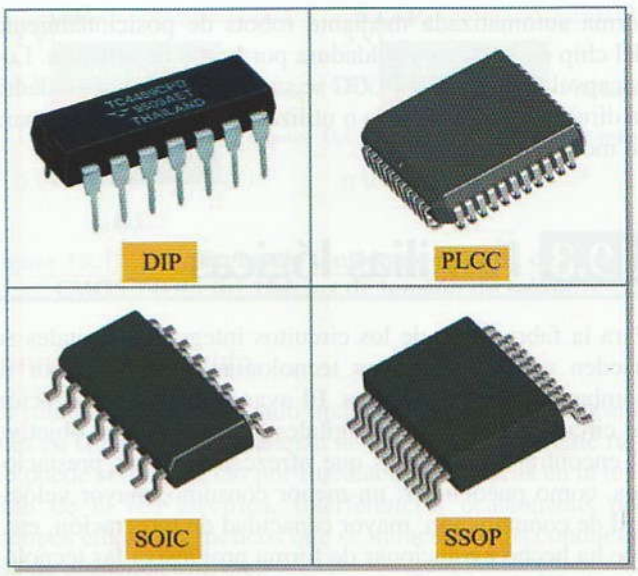


Figura 19.32. Encapsulados de los CI.

El encapsulado **DIP** consta de dos hileras paralelas de patillas que se conectan al circuito de forma sencilla a través de un zócalo de conexión. Los CI con encapsulado DIP son muy fáciles de manejar para la construcción de prototipos en placas de montaje rápido, como las protobard que vamos a utilizar en las Actividades prácticas.

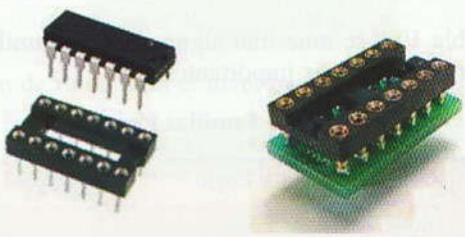


Figura 19.33. Zócalos de conexión para encapsulados DIP.

Cada uno de los terminales del CI va numerado. El número 1 se sitúa en un pequeño agujero que se incluye en un extremo. En la Figura 19.34 se muestra, como ejemplo, la disposición de patillas de un CI de 14 patillas.

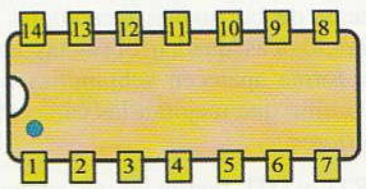


Figura 19.34. Numeración de patillas.

El encapsulado SSOP es el más pequeño de todos y se utiliza para montaje y soldadura directa sobre la placa del circuito impreso. Habitualmente se montan y sueldan de

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

forma automatizada mediante robots de posicionamiento del chip en la placa y soldadura por horno de refusión. Los encapsulados SOIC y PLCC se suelen montar por soldadura directamente a la placa o utilizar zócalos especiales para su montaje.

19.8 Familias lógicas

Para la fabricación de los circuitos integrados digitales se pueden aplicar diferentes tecnologías, conocidas por el nombre de familias lógicas. El avance en la investigación de circuitos electrónicos digitales ha tenido como objetivo el encontrar dispositivos que ofrezcan mayores prestaciones, como pueden ser: un menor consumo, mayor velocidad de conmutación, mayor capacidad de integración, etc., que ha hecho evolucionar de forma progresiva las tecnologías de fabricación. Cada una de las familias lógicas posee unas determinadas características. La función del diseñador de circuitos digitales será utilizar aquellas que presenten mayores ventajas y se adapten mejor al diseño, buscando siempre una reducción del consumo de potencia eléctrica y un aumento de la velocidad de conmutación.

Una **familia lógica** es el conjunto de todos los componentes lógicos fabricados con la misma tecnología.

En la Tabla 19.8 se muestran algunas de las familias lógicas históricamente más importantes.

Tabla 19.8. Familias lógicas.

RTL	Resistor-Transistor Logic
DTL	Diode-Transistor Logic
ECL	Emitter-Coupled Logic
TTL	Transistor-Transistor Logic
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
BiCMOS	Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor

El rápido avance de las nuevas tecnologías provoca que ciertas familias lógicas queden obsoletas en muy pocos años. De esta forma aparecen subfamilias dentro de una determinada familia que mejoran las características de las versiones anteriores.

Las familias RTL y DTL fueron las que aparecieron primero, pero después aparecieron las familias TTL y ECL. La familia TTL ha sido utilizada durante muchos años, por lo que se consiguen componentes fácilmente en el mercado. La familia ECL supuso un gran avance en sistemas que requerían operar a gran velocidad, pero ha sido superada y sustituida por la familia CMOS. Esta última familia consigue una gran densidad de integración y bajo consumo de energía, lo que le ha convertido en la familia predominante en el mercado. La familia BiCMOS, que es una combinación de CMOS y TTL se utiliza en forma selectiva para casos en que la familia CMOS no puede manejar adecuadamente la corriente necesaria o la velocidad.

Las dos familias lógicas más utilizadas en la actualidad son la TTL basada en los transistores bipolares y MOSFET basada en los transistores unipolares de efecto de campo.

Uno de los criterios más importantes en la construcción de puertas lógicas es la uniformidad, por lo que la base de una familia lógica es que las diferencias que puedan existir entre las diferentes puertas lógicas sean las mínimas.

19.8.1. Características de una familia lógica

Antes de pasar al estudio de las características específicas de las familias más importantes, como la TTL y la CMOS, vamos a definir los principales parámetros y características de un circuito lógico integrado. Estos parámetros los podremos encontrar en las hojas de características que nos facilitan los fabricantes y que, en la actualidad, se encuentran con facilidad en Internet.

Tensión de alimentación (V_{CC})

Para que los circuitos lógicos integrados en un CI puedan funcionar, es necesario conectarlos a una fuente de alimentación de corriente continua, que garantice que la tensión suministrada (V_{CC}) al CI permanezca lo más constante posible aunque varíe la intensidad de corriente suministrada por la misma. El positivo de dicha fuente se suele conectar a la patilla del CI que aparece señalada como V_{CC} y el negativo a otra denominada GND, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 19.35.

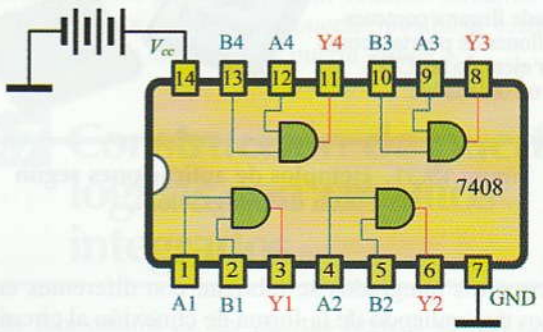


Figura 19.35. Conexión de la fuente de alimentación a un CI de la serie 7408.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Así, por ejemplo, para la familia lógica TTL la tensión de alimentación es de +5 V, aunque se admite un rango de tolerancia que varía entre 4,75 V y 5,25 V. Para alimentación de los circuitos CMOS se admite un rango de tensión mucho más amplio, que varía entre los 3 V y los 18 V.

Niveles de tensión de entrada y salida

Los niveles de tensión de entrada nos indican la tensión que deberemos aplicar a la entrada de una puerta lógica para que ésta lo acepte como un estado lógico «1» o «0». Esta tensión puede variar dentro de un pequeño margen. En las hojas de características nos indican los valores límites que se corresponden a los niveles lógicos, como son:

$V_{IL(máx)}$ = máxima tensión de entrada (I) admisible para que la puerta interprete un «0» lógico o un nivel bajo (L).

$V_{IH(mín)}$ = mínima tensión de entrada (I) admisible para que la puerta interprete un «1» lógico o un nivel alto (H).

En la Figura 19.36(a) se muestra, como ejemplo, los niveles de tensión de entrada de la serie TTL estándar para conseguir los niveles lógicos.

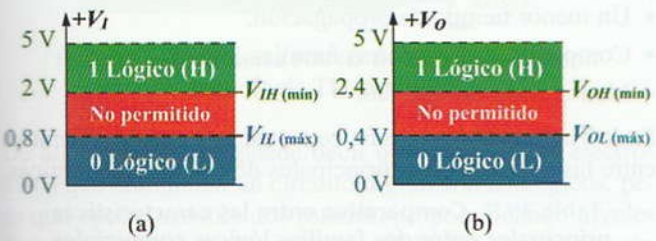


Figura 19.36. (a) Niveles de tensión de entrada de la serie TTL estándar. (b) Niveles de tensión de salida.

Dado que las puertas lógicas se interconectan entre sí, es importante conocer la tensión que suministra una puerta a su salida en los dos estados lógicos, para así asegurarnos de que puede activar a las siguientes puertas que se conecten a su salida. Los niveles de tensión de salida son:

$V_{OL(máx)}$ = máxima tensión que aparece en la salida (O) para el estado lógico «0» o nivel bajo (L).

$V_{OH(mín)}$ = mínima tensión que aparece en la salida (O) para el estado lógico «1» o nivel alto (H).

En la Figura 19.36(b) se muestra, como ejemplo, los niveles de tensión de salida de las serie TTL estándar y en la Figura 19.37 los niveles de tensión de entrada y salida para el circuito CMOS 74HC.

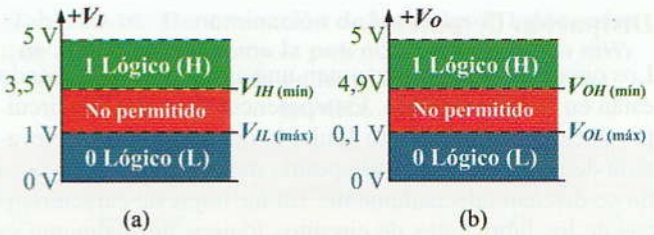


Figura 19.37. (a) Niveles de tensión de entrada de la serie CMOS 74HC. (b) Niveles de tensión de salida.

Inmunidad al ruido

El ruido se produce cuando aparecen variaciones indeseables en la tensión que manejan las puertas lógicas. Este ruido puede ser producido por fluctuaciones bruscas en la tensión de la red eléctrica, interferencias ocasionadas por campos electromagnéticos que se inducen en los conductores de alimentación, etc.

La inmunidad al ruido de un circuito lógico nos indica su capacidad para tolerar ruido (fluctuaciones de tensión no deseadas) sin que se vean afectados los valores lógicos de salida.

El margen de ruido en voltios (V_N) que tolera un circuito lógico se puede calcular de la siguiente forma:

- Margen de ruido para el nivel alto:

$$V_{NH} = V_{OH(mín)} - V_{IH(mín)}$$

- Margen de ruido para el nivel bajo:

$$V_{NL} = V_{IL(máx)} - V_{OL(máx)}$$

Actividad resuelta 19.10

Analiza los niveles de tensión de entrada y salida de la serie TTL estándar (Figura 19.36) y de las serie CMOS 74HC (Figura 19.37) y averigua su margen de ruido.

Solución: Para la serie TTL estándar:

$$V_{NH} = V_{OH(mín)} - V_{IH(mín)} = 2{,}4\text{ V} - 2\text{ V} = 0{,}4\text{ V}$$

$$V_{NL} = V_{IL(máx)} - V_{OL(máx)} = 0{,}8\text{ V} - 0{,}4\text{ V} = 0{,}4\text{ V}$$

Para la serie CMOS 74HC:

$$V_{NH} = V_{OH(mín)} - V_{IH(mín)} = 4{,}9\text{ V} - 3{,}5\text{ V} = 1{,}4\text{ V}$$

$$V_{NL} = V_{IL(máx)} - V_{OL(máx)} = 1\text{ V} - 0{,}1\text{ V} = 0{,}9\text{ V}$$

De los resultados de estos cálculos se puede deducir que los circuitos de la familia CMOS poseen una mayor inmunidad al ruido que los de la familia TTL.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Disipación de potencia

Los circuitos lógicos consumen una cierta potencia cuando están en funcionamiento. Esta potencia hace que los circuitos se calienten por efecto Joule, lo que provoca una elevación de su temperatura, que podría dañar los dispositivos si no se diseñan adecuadamente. En las hojas de características de los fabricantes de circuitos lógicos normalmente se indica la disipación de potencia en mW por cada una de las puertas lógicas incluidas en el CI.

Así, por ejemplo, la familia TTL 74 posee una disipación de potencia por puerta de 10 mW, mientras que la familia CMOS 74HC posee una disipación de potencia mucho menor, del orden de 0,0025 mW.

Capacidad de carga (fan-out)

En el diseño de circuitos lógicos es muy habitual conectar varias entradas de otras puertas a la misma salida de una puerta lógica (Figura 19.38). Dado que la corriente que puede suministrar la salida de una puerta es limitada, si conectásemos más puertas de las indicadas por el fabricante, no se podría garantizar que la tensión de salida de la misma sea suficiente para activar las puertas conectadas.

El fan-out nos indica el número máximo de puertas que pueden conectarse a la salida de otra puerta de la misma familia lógica. Así, por ejemplo, la familia TTL 74 posee fan-out de 10 puertas, mientras que la familia CMOS 74HC posee un fan-out mucho mayor, del orden de 100 puertas.

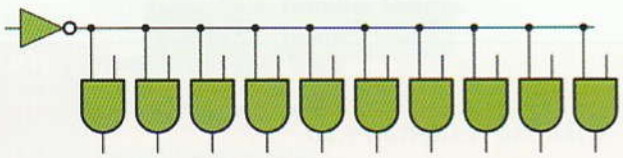


Figura 19.38. Ejemplo de un fan-out de 10 para la salida de una puerta NOT de la familia TTL 74.

Retardo de propagación

Cuando aplicamos una señal de entrada a una puerta lógica y ésta cambia su estado lógico en la salida transcurre un pequeño tiempo, que se conoce como retardo de propagación (Figura 19.39). Este retardo limita el funcionamiento de la puerta lógica cuando la señal de entrada cambia a gran velocidad, es decir, a frecuencias de impulso elevadas. El retardo de propagación se mide en nanosegundos (ns), o sea 10^{-9} segundos.

Así, por ejemplo, la familia TTL 74AS posee un retardo de propagación de 3 ns (véase Figura 19.39) y una frecuencia máxima de señal de 200 Mhz (millones de impulsos por segundo), mientras que la familia CMOS 74HC posee un retardo de propagación de 8 ns y una frecuencia máxima de señal de 40 Mhz.

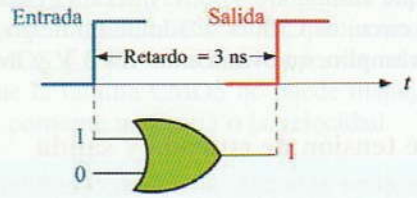


Figura 19.39. Ejemplo de retardo de propagación de una puerta lógica de la familia TTL 74AS.

19.8.2. Comparativa entre las familias lógicas

A la hora de seleccionar una determinada familia lógica para un determinado diseño, habrá que tener en cuenta las características que mejor se adapten al mismo, teniendo en cuenta que siempre será mejor:

- Una gran densidad de integración.
- Un mayor rango de la tensión de alimentación
- Un mayor margen de ruido o inmunidad al ruido.
- Un menor consumo o disipación de potencia.
- Una mayor capacidad de carga o fan-out.
- Un menor tiempo de propagación.
- Compatibilidad con otras familias lógicas.
- Menor coste económico.

En la Tabla 19.9 se muestra, como ejemplo, una comparativa entre las características principales de dos familias lógicas.

Tabla 19.9. Comparativa entre las características principales entre dos familias lógicas comerciales.

		TTL 74	CMOS 74HC
Tensión de alimentación	V_{CC} (V)	4,5-5,5	3-15
Margen de ruido	V_{NH} (V)	0,4	1,4
	V_{NL} (V)	0,4	0,9
Potencia consumida	P (mW)	10	0,0025
Capacidad de carga	Fan-out	10	100
Tiempo de propagación	t_p (ns)	9	8
Frecuencia máxima	F (MHz)	35	40
Niveles de tensión de entrada	$V_{IL(máx)}$	0,8	1
	$V_{IH(mín)}$	2	3,5
Niveles de tensión de salida	$V_{OL(máx)}$	0,4	0,1
	$V_{OH(mín)}$	2,4	4,9

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

19.8.3. Familia lógica TTL

La familia TTL (*Transitor-Transistor-Logic*), que proviene del término lógica de transistor a transistor, está constituida por resistencias, diodos y transistores bipolares. En la Figura 19.40 se muestra, como ejemplo, el circuito interno de una puerta NAND de dos entradas. Para poder entender este circuito, primero habrá que estudiar el funcionamiento del diodo y el transistor bipolar, y esto lo dejamos para la segunda parte de este texto, donde se estudia la electrónica analógica.

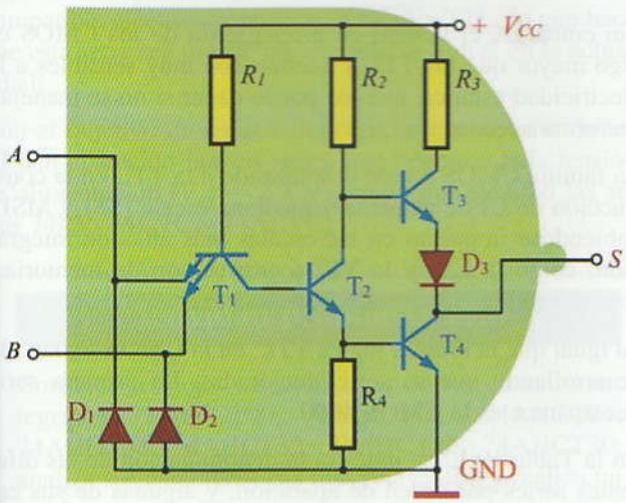


Figura 19.40. Puerta NAND de dos entradas con tecnología TTL estándar.

De alguna forma, se puede decir que los circuitos electrónicos que componen un circuito digital son analógicos, pero que operan en sólo dos estados, proporcionando niveles de tensión alto o bajo en función de los niveles de tensión de las entradas.

La familia TTL ha sido la predominante en el mercado durante más de 20 años. Su éxito se ha basado en su bajo coste y en la gran variedad de circuitos fabricados por la mayor parte de las casas comerciales. En la actualidad van siendo desplazados por otras tecnologías como la CMOS y la BiCMOS, limitándose su uso a la construcción de CI de pequeña y mediana escala (SSI y MSI).

Dentro de la familia lógica TTL se han ido desarrollando nuevas series con el fin de mejorar las prestaciones de las anteriores. La primera serie que aparece en el mercado es la TTL estándar o más comúnmente conocida como serie 74 (54 para aplicaciones militares).

En la Tabla 19.10 se muestra la denominación de las diferentes series por orden de aparición y algunas de sus características más relevantes. Todas ellas tienen en común una tensión de alimentación comprendida entre 4,5 y 5,5 V.

Tabla 19.10. Denominación de las series TTL por orden de aparición, así como la potencia consumida en mW, el tiempo de retardo en ns y la frecuencia máxima en MHz.

TTL	Características	mW	ns	MHz
74	Estándar	10	10	35
74S	Mejora del tiempo de propagación	20	3	125
74LS	Menor consumo	2	10	45
74ALS	Menor consumo y buen tiempo de propagación	1	4	70
74AS	Tiempo bajo de propagación	7	1,5	200
74F	Buen equilibrio entre potencia y tiempo	4	3	100

Para identificar las puertas lógicas que van incluidas en cada uno de los circuitos integrados y la cantidad de entradas que posee cada una, se le añaden un par de dígitos a la denominación de la serie. Así, por ejemplo, el circuito integrado 7404, se correspondería con un CI de tecnología TTL y con 6 puertas NOT. En la Tabla 19.11, se muestra el significado de estos dos dígitos. Esta denominación es común para la familia CMOS.

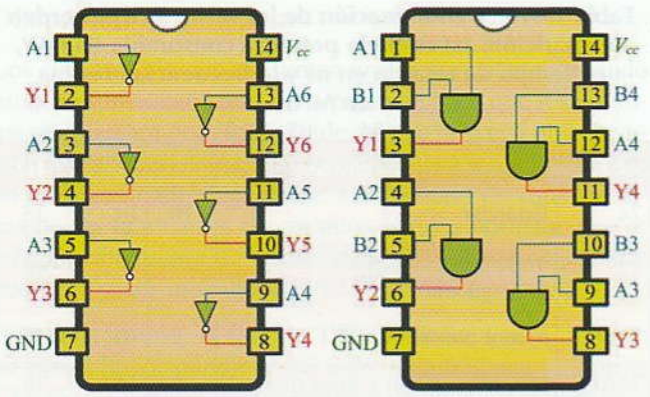
Tabla 19.11. Significado de los dos últimos dígitos en el número de serie de un CI digital.

00	4 NAND de 2 entradas
02	4 NOR de 2 entradas
04	6 NOT
08	4 AND de 2 entradas
10	3 NAND de 2 entradas
11	3 AND de 2 entradas
20	2 NAND de 4 entradas
21	2 AND de 4 entradas
27	3 NOR de 3 entradas
30	1 AND de 8 entradas
32	4 OR de 2 entradas
86	4 XOR de 2 entradas
133	1 NAND de 13 entradas

En la Figura 19.41 se muestra, como ejemplo, los diagramas de conexión de las puertas de dos CI de la familia TTL 74.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



(a) 7404 (b) 7408

Figura 19.41. Diagramas de conexión de dos CI de la familia TTL 74.

Actividad propuesta 19.7

Consulta las hojas características de los circuitos integrados 74F00, 74F02, 74F04, 74F08, 74F32, 74F86, analiza sus características más relevantes y realiza un cuadro con sus diagramas de conexión.

Estas hojas características las podrás encontrar con facilidad en Internet en las siguientes páginas web:

- http://www.datasheetlocator.com/es/
- http://www.datasheetcatalog.net/es/

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de los circuitos integrados 74F00, 74F02, 74F04, 74F08, 74F32 y 74F86.*

19.8.4. Familia lógica CMOS

La familia CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) construye sus puertas lógicas con transistores unipolares MOSFET de canal N y de canal P, que ya estudiaremos en posteriores unidades didácticas. En la Figura 19.42 se muestra, como ejemplo, una puerta NAND de dos entradas con tecnología CMOS.

Los circuitos integrados con tecnología CMOS se han ido imponiendo en el mercado gracias a la mejora de algunas de sus características, como son:

- Mayor inmunidad al ruido.
- Tensión de alimentación más flexible.
- Menor consumo.
- Mayor densidad de integración.

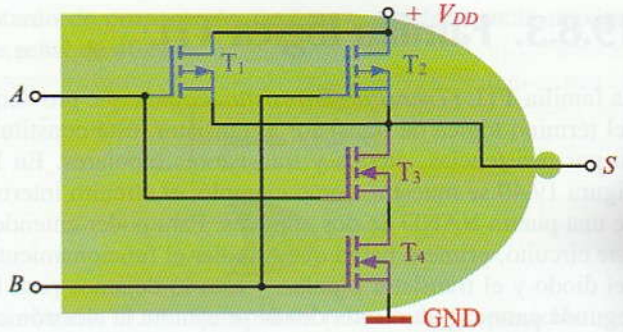


Figura 19.42. Puerta NAND CMOS.

Sin embargo, el tiempo de propagación de los CMOS es algo mayor que los TTL y además son muy sensibles a la electricidad estática, que los puede dañar si no se manejan de forma adecuada.

La familia CMOS ha ido desplazando a la TTL en la construcción de CI de pequeña y mediana escala (SSI y MSI), habiéndose impuesto en las escalas más altas de integración, como la LSI y la VSI (construcción de memorias, contadores, registros, microprocesadores, etc.).

Al igual que la familia lógica TTL, en la CMOS se han ido desarrollando nuevas series mejoradas. La primera serie que aparece es la CMOS 4000.

En la Tabla 19.12 se muestra la denominación de las diferentes series por orden de aparición, y algunas de sus características más relevantes. Todas ellas tienen en común una tensión de alimentación de 5 V, excepto la serie 4000 que admite una tensión de alimentación entre 3 y 15 V.

Tabla 19.12. Denominación de las series TTL por orden de aparición, así como la potencia consumida en mW, el tiempo de retardo en ns y la frecuencia máxima en MHz.

CMOS	Características	mW	ns	MHz
4000	Baja velocidad	0,3	50	12
74HC	Mejora de la velocidad	1	8	40
74HCT	Compatible con TTL	1	8	40
74AC	Mejora la velocidad	0,5	4	125
74ACT	Compatible con TTL	0,5	4	125
74AHC	Mejora la velocidad	0,006	3	130
74AHCT	Alta velocidad y compatible con TTL	0,006	3	130

La primera serie CMOS es la 4000 que poseía el inconveniente de que los terminales de los CI no se encontraban en el mismo orden que los TTL. Posteriormente aparecen las

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

series 74HC y 74HCT, que mejoran la velocidad de conmutación y poseen el mismo orden en los terminales que los TTL; además la serie 74HCT es eléctricamente compatible con TTL. Después aparecen las series 74AC y 74ACT, que ofrecen una mayor inmunidad al ruido y una mayor velocidad de conmutación, con el inconveniente de que no existe compatibilidad en el orden de los terminales con TTL, aunque la 74ACT es compatible eléctricamente con TTL.

La serie 74HCT es la que posee una menor potencia de disipación y un menor tiempo de propagación, lo que supone una mayor frecuencia de conmutación. Además es compatible eléctricamente con la familia TTL, lo que hace que esta serie sea una de las que más se utiliza en la actualidad.

Con el objetivo de reducir la potencia y el tamaño de los CI han aparecido nuevas series que operan a baja tensión de alimentación (V_{CC} = 3,3 V), como por ejemplo las series 74LV, 74LVC y 74ALVC.

Actividad propuesta 19.8

Consulta las hojas características de los circuitos integrados 74AHCT00, 74AHCT02, 74AHCT04, 74AHCT08, 74AHCT32, 74AHCT86, 74AHCT30, analiza sus características más relevantes, y realiza un cuadro con sus diagramas de conexión.

Estas hojas características las podrás encontrar con facilidad en Internet en las siguientes páginas web:

- http://www.datasheetlocator.com/es/
- http://www.datasheetcatalog.net/es/

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de estos circuitos integrados.*

19.8.5. Precauciones con los circuitos CMOS

Los CMOS son unos dispositivos muy sensibles a las descargas electrostáticas, de tal forma que si no se toman las medidas oportunas podrían llegar a destruirlos. Las cargas electrostáticas suelen generarse al frotarse las superficies aislantes, como por ejemplo al arrastrar los zapatos por una moqueta en un ambiente seco, y pueden llegar a alcanzar tensiones bastante elevadas. Si una persona cargada toca los terminales de un CI, se produce una pequeña descarga eléctrica que puede destruir las uniones de los semiconductores que forman el chip, sobre todo en el caso de los CMOS.

En la actualidad se ha conseguido minimizar los efectos de las posibles descargas electrostáticas gracias a la inclusión de circuitos de protección dentro del CI, como pueden ser la conexión de diodos Zener a las entradas que conducen y limitan la tensión de entrada a unos niveles no peligrosos. A pesar de todo, a continuación se indican las precauciones a tomar para trabajar con CMOS:

- Los CMOS deberían estar almacenados con los terminales en contacto con espuma conductora.
- En ningún caso deben tocarse los terminales con los dedos.
- Si se retiran de la espuma conductora se deben insertar en el circuito o depositar con los terminales en contacto con una superficie conductora a masa.
- No insertar CMOS en los zócalos de conexión con la tensión de alimentación conectada.
- Las herramientas y bancos de trabajo se deben conectar a tierra.

En la Figura 19.43 se muestra a un operario trabajando con MOSFET con medidas excepcionales de precaución, como pueden ser la puesta a tierra del equipo de soldadura y de la muñeca del operario.

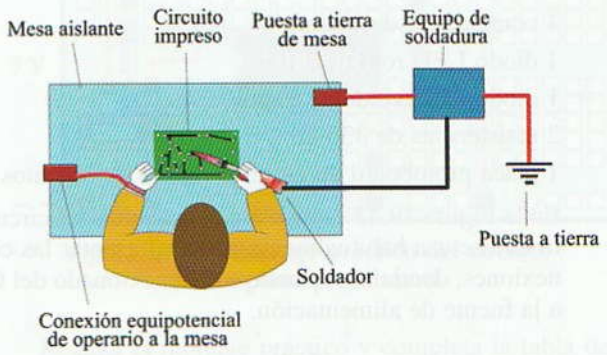


Figura 19.43. Medidas de precaución excepcionales para manipular MOSFET.

- Nunca se debe dejar ninguna entrada de una puerta lógica sin conectar, ya que no se podría predecir el nivel lógico que alcancen dichas entradas. Las entradas sin conectar son sensibles a las interferencias y una carga estática podría desestabilizar el funcionamiento correcto de la puerta.

Esta última precaución es valida también para los CI de la familia TTL. ¿Qué hacemos entonces con los terminales de entrada de una puerta lógica que no necesitamos?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

La solución más acertada es conectar todas las entradas que no se utilicen a la tensión de alimentación V_{CC} o masa (GND) dependiendo del tipo de puerta lógica:

- Para las puertas AND y NAND se conectan las entradas a V_{CC} a través de una resistencia de 1 kΩ con el fin de llevarlas al nivel lógico «1».
- Para las puertas OR y NOR se conectan las entradas a masa para fijarlas al nivel lógico «0».

En la Figura 19.44 se muestra, como ejemplo, una puerta de tres entradas en las que solamente se necesitan dos para la realización del circuito lógico.

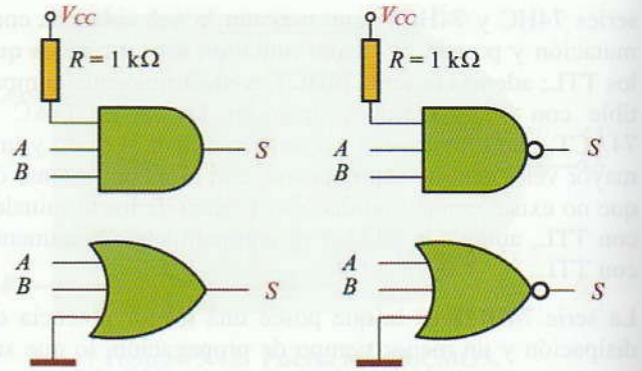


Figura 19.44. Entradas sin utilizar conectadas a la tensión de alimentación o masa dependiendo del tipo de puerta.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

19.1 Puerta lógica NOT. Se trata de que compruebes de forma práctica la tabla de la verdad de la puerta NOT. Para ello vamos a necesitar los siguientes componentes:

1 CI 74HCT04 (6 × NOT) o similar
1 conmutador deslizante
1 diodo LED rojo de 5 mm
1 diodo LED verde de 5 mm
2 resistencias de 330 Ω
1 placa protoboard de montaje rápido de circuitos

En la Figura 19.45 se muestra el esquema del circuito que se usa habitualmente para representar las conexiones, donde no se incluye el conexionado del CI a la fuente de alimentación.

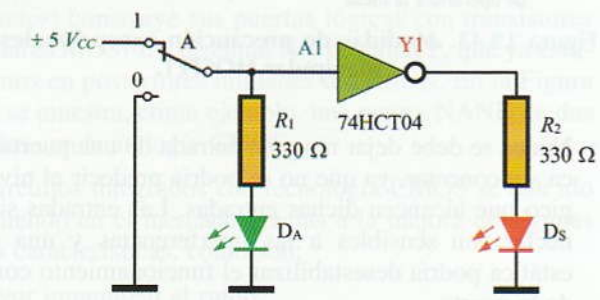


Figura 19.45. Esquema del circuito puerta NOT.

El diodo verde se conecta a la entrada de la puerta y nos indicará el estado de la entrada. El rojo se conecta a la salida. Para la activación de la entrada se utiliza un conmutador deslizante (Figura 19.46), de tal forma que proporcionará un «1» lógico cuando su posición conecte con la tensión de alimentación y un «0» lógico cuando cambie su posición a masa.

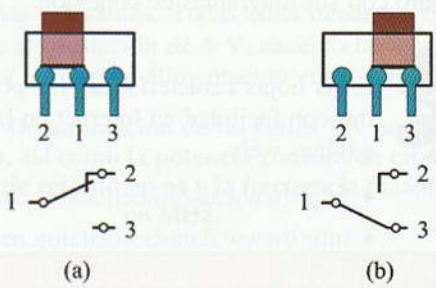


Figura 19.46. Conmutador deslizante. (a) Posición 1-2. (b) Posición 1-3.

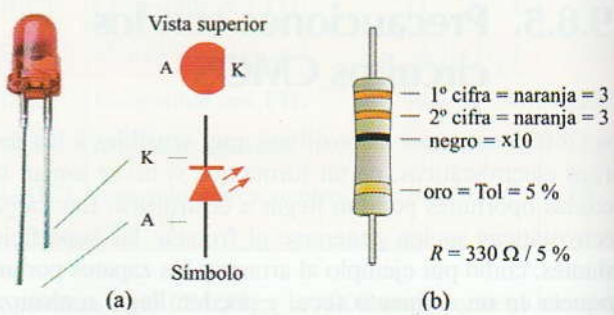


Figura 19.47. (a) Conexiones del diodo LED. (b) Código de colores de la resistencia.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la Figura 19.48 se muestra cómo sería el esquema práctico de montaje del circuito, donde se ha incluido la alimentación eléctrica del CI.

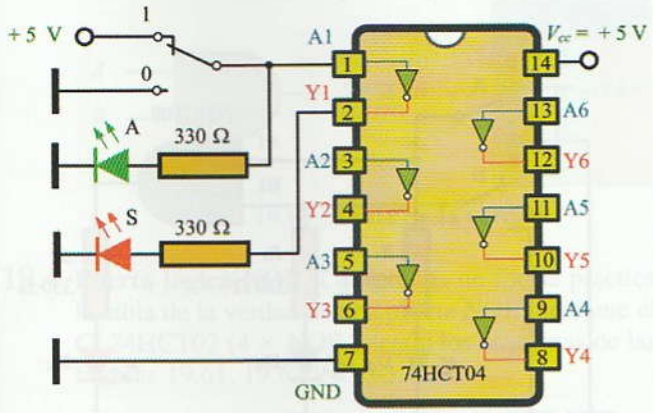


Figura 19.48. Esquema práctico del CI.

Para el montaje del circuito se puede utilizar una placa protoboard de montaje rápido sin soldadura o un entrenador didáctico de electrónica digital. La ventaja de los entrenadores es que vienen equipados con los diferentes dispositivos necesarios para la realización rápida de la práctica, como pueden ser: las fuentes de alimentación, generadores de señales digitales, conmutadores, diodos LED, etc. En la Figura 19.49 se muestra, como ejemplo, el aspecto de un entrenador comercial. Se trata del entrenador Universal Trainer que sirve para realizar experiencias tanto con circuitos digitales como analógicos.

Figura 19.49. Entrenador Universal Trainer.

En www.paraninfo.es podrás consultar el manual del Universal Trainer.

Nosotros vamos a proponer realizar el montaje de esta actividad práctica sobre una placa protoboard. Estas placas poseen una serie de orificios interconectados entre sí, donde se pueden conectar de forma rápida los componentes. En la Figura 19.50 se muestra el esquema de conexiones de un modelo de placa protoboard.

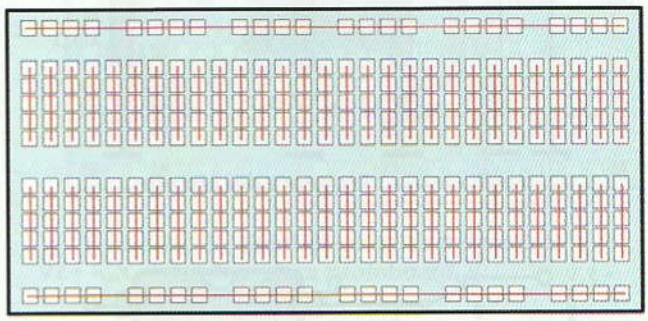


Figura 19.50. Esquema de conexionado interno de una placa protoboard de montaje rápido.

Las filas superior e inferior, más separadas que el resto, se suelen utilizar para conectar la tensión de alimentación a la placa.

En la Figura 19.51 se muestra el esquema práctico de la puerta NOT montado sobre una placa protoboard.

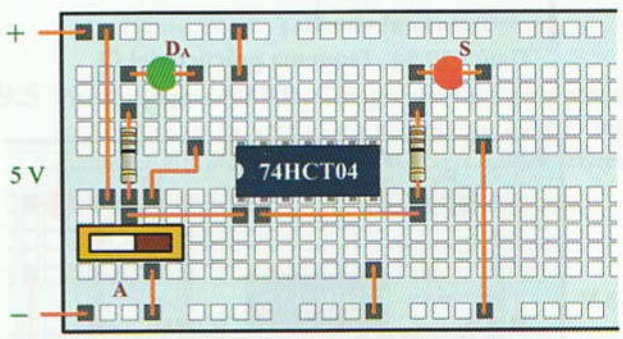


Figura 19.51. Montaje práctico del circuito sobre placa protoboard.

Realiza el montaje práctico y completa la tabla de la verdad de la Figura 19.52.

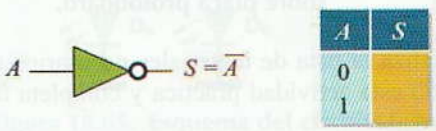


Figura 19.52. Tabla de la verdad.

19.2 Puerta lógica OR. Comprueba de forma práctica la tabla de la verdad de una puerta OR mediante el CI 74HCT32 (4 × OR), según los esquemas de la Figuras 19.53, 19.54 y 19.55.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

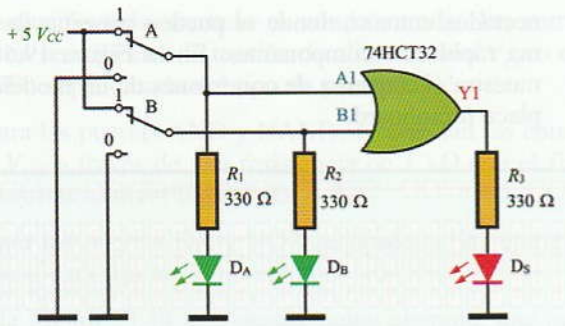


Figura 19.53. Esquema del circuito.

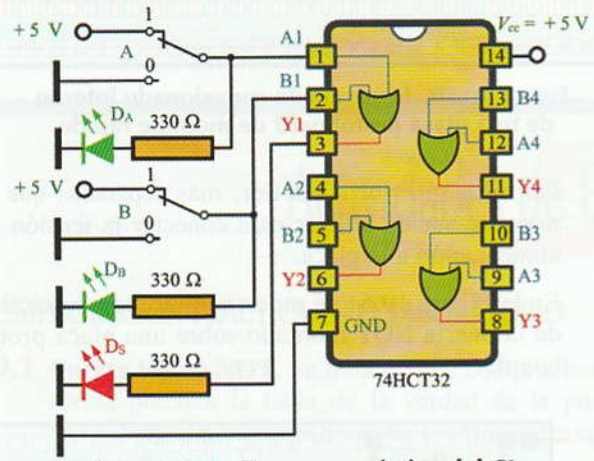


Figura 19.54. Esquema práctico del CI.

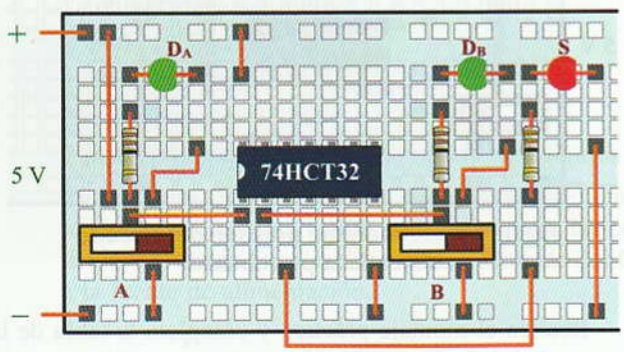
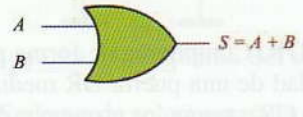


Figura 19.55. Montaje práctico del circuito sobre placa protoboard.

Realiza la lista de materiales necesarios para llevar a cabo esta actividad práctica y completa la tabla de la verdad.



A	B	S
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Figura 19.56. Tabla de la verdad.

19.3 Puerta lógica AND. Comprueba de forma práctica la tabla de la verdad de una puerta AND mediante el CI 74HCT08 (4 × AND), según los esquemas de la Figuras 19.57, 19.58 y 19.59.

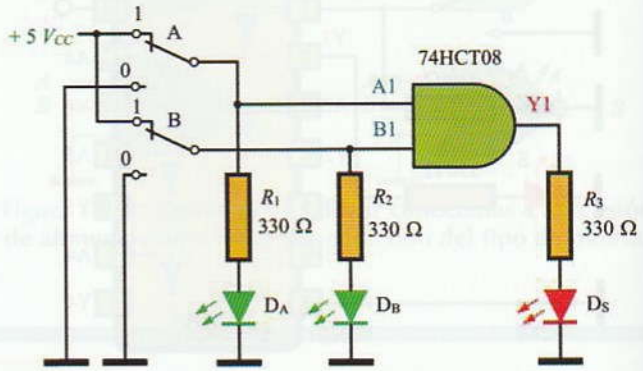


Figura 19.57. Esquema del circuito.

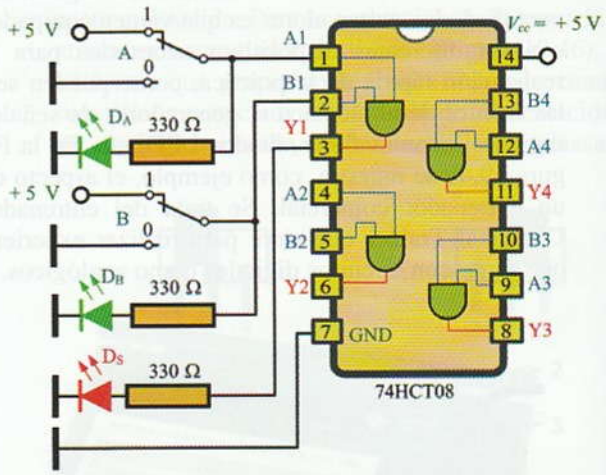


Figura 19.58. Esquema práctico del CI.

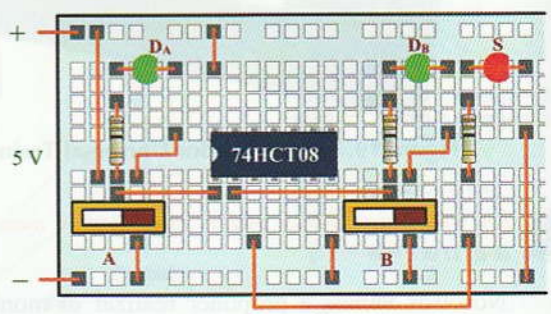
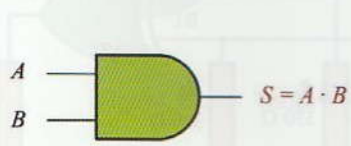


Figura 19.59. Montaje práctico del circuito sobre placa protoboard.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Realiza la lista de materiales necesarios para llevar a cabo esta actividad práctica y completa la tabla de la verdad.



A	B	S
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Figura 19.60. **Tabla de la verdad.**

19.4 Puerta lógica NOR. Comprueba de forma práctica la tabla de la verdad de una puerta NOR mediante el CI 74HCT02 (4 × NOR), según los esquemas de las Figuras 19.61, 19.62 y 19.63.

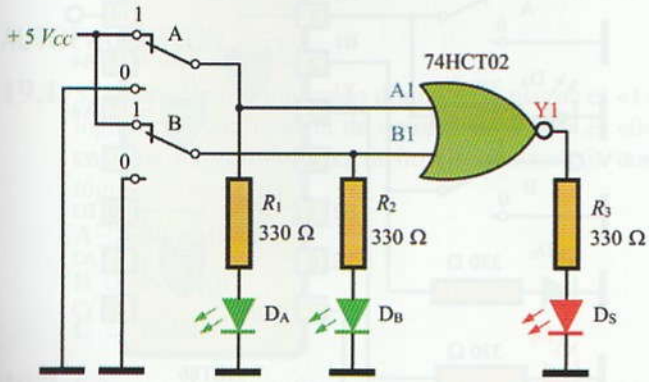


Figura 19.61. **Esquema del circuito.**

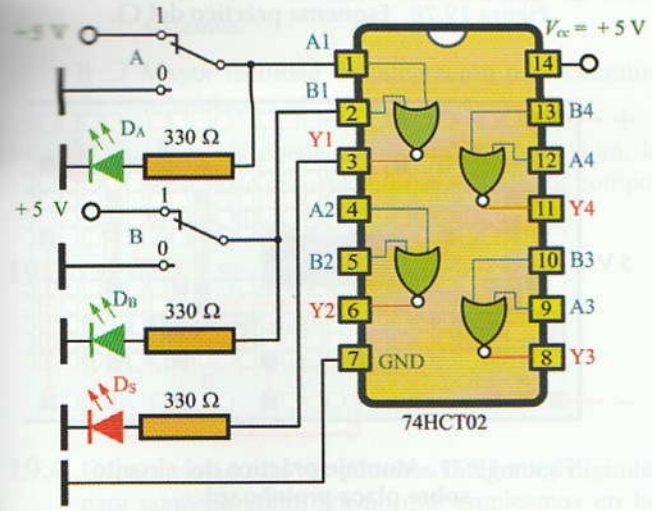


Figura 19.62. **Esquema práctico del CI.**

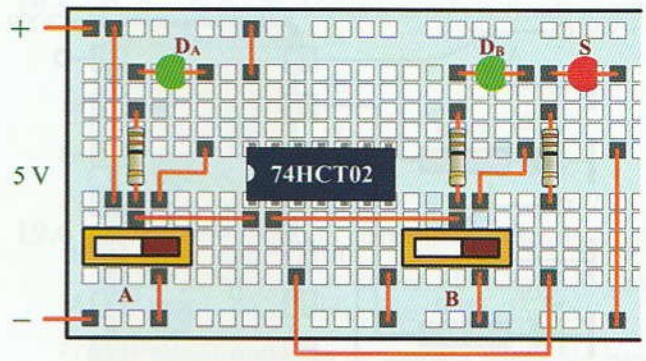
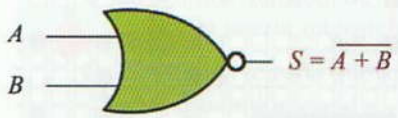


Figura 19.63. **Montaje práctico del circuito sobre placa protoboard.**

Realiza la lista de materiales necesarios para llevar a cabo esta actividad práctica y completa la tabla de la verdad.



A	B	S
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Figura 19.64. **Tabla de la verdad.**

19.5 Puerta lógica NAND. Comprueba de forma práctica la tabla de la verdad de una puerta NAND mediante el CI 74HCT00 (4 × NAND), según los esquemas de la Figuras 19.65, 19.66 y 19.67.

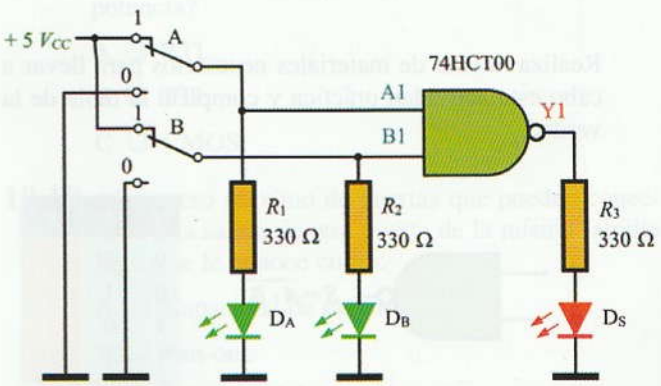


Figura 19.65. **Esquema del circuito.**

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

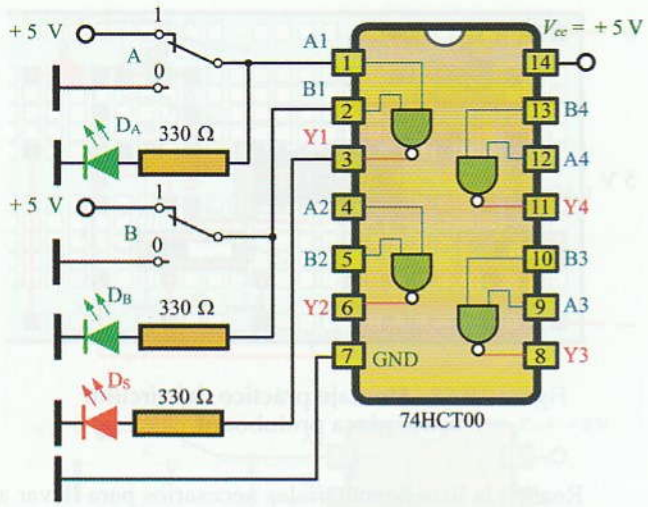


Figura 19.66. **Esquema práctico del CI.**

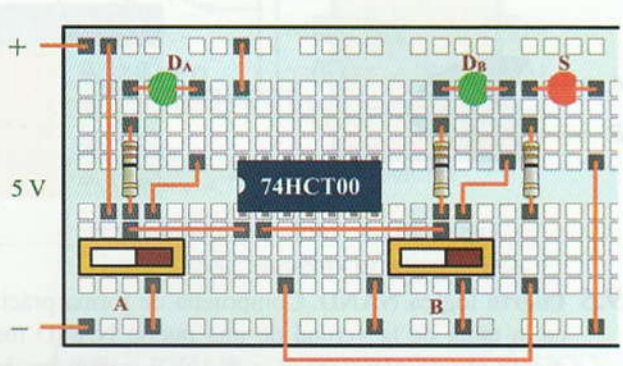
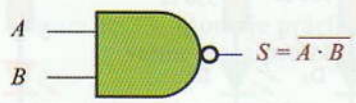


Figura 19.67. **Montaje práctico del circuito sobre placa protoboard.**

Realiza la lista de materiales necesarios para llevar a cabo esta actividad práctica y completa la tabla de la verdad.



A	B	S
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Figura 19.68. **Tabla de la verdad.**

19.6 Puerta lógica XOR. Comprueba de forma práctica la tabla de la verdad de una puerta XOR mediante el CI 74HCT86 (4 × XOR), según los esquemas de las Figuras 19.69, 19.70 y 19.71.

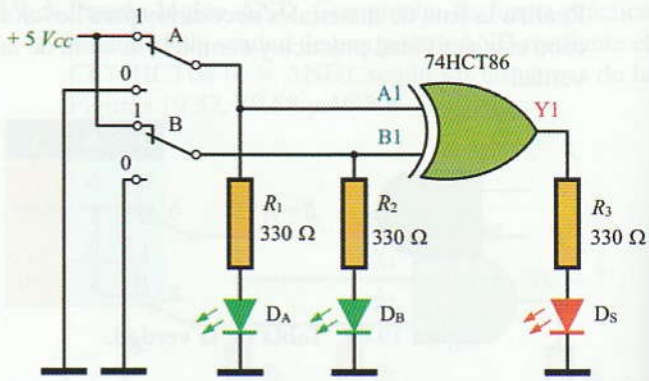


Figura 19.69. **Esquema del circuito.**

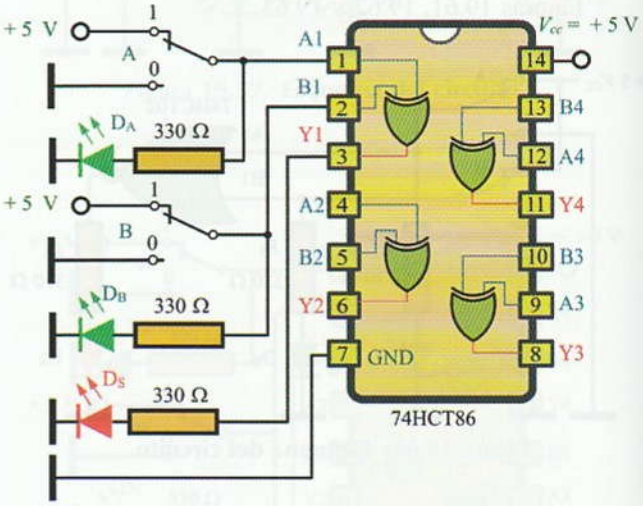


Figura 19.70. **Esquema práctico del CI.**

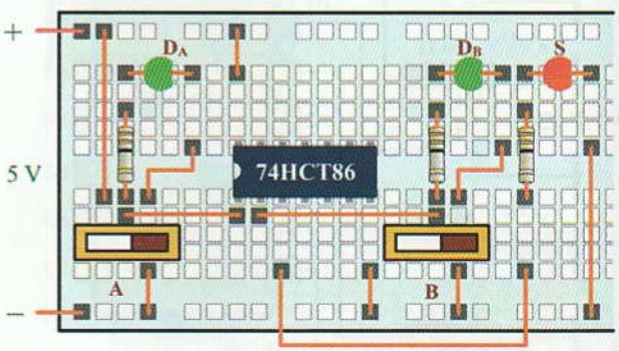
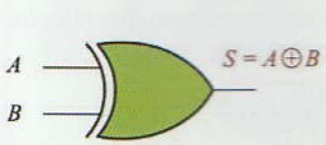


Figura 19.71. **Montaje práctico del circuito sobre placa protoboard.**

Realiza la lista de materiales necesarios para llevar a cabo esta actividad práctica y completa la tabla de la verdad.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



A	B	S
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Figura 19.72. Tabla de la verdad.

19.7 Encuentra las hojas características de los circuitos integrados utilizados en estas actividades prácticas y observa sus características más significativas.

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de los circuitos integrados 74HCT00, 74HCT02, 74HCT04, 74HCT08, 74HCT32, 74HCT86.

AUTOEVALUACIÓN

19.1 Si en un circuito integrado digital se consigue el «1» lógico con una tensión de entrada de 5 V y el «0» con una tensión de 0 V, dicho circuito trabaja con lógica:

A ❑ Negativa.

B ❑ Positiva.

C ❑ Indefinida.

19.2 Indica cuál de las afirmaciones es correcta respecto a los circuitos digitales frente a los analógicos:

A ❑ Susceptible de sufrir interferencias de otros sistemas.

B ❑ Mayor facilidad de integración para circuitos repetitivos.

C ❑ La salida puede variar con la temperatura, la tensión de alimentación, estado de los componentes, etc.

19.3 Las siglas LSI significan integración a:

A ❑ Pequeña escala.

B ❑ Mediana escala.

C ❑ Gran escala.

19.4 El encapsulado de los circuitos integrados digitales para conectar sobre zócalo que empleamos en las actividades prácticas de laboratorio son del tipo:

A ❑ DIP.

B ❑ SOIC.

C ❑ SSOP.

19.5 ¿Cuál es la familia lógica que más se tiende a utilizar en la actualidad?

A ❑ RTL.

B ❑ TTL.

C ❑ CMOS.

19.6 ¿Cuál es el significado de la característica $V_{IL(máx)}$?

A ❑ Máxima tensión de entrada admisible para que la puerta interprete un «0» lógico.

B ❑ Mínima tensión de entrada admisible para que la puerta interprete un«1» lógico.

C ❑ Máxima tensión que aparece en la salida para el estado lógico «0».

19.7 ¿Cuál es el significado de la característica $V_{OH(mín)}$?

A ❑ Máxima tensión de entrada admisible para que la puerta interprete un «0» lógico.

B ❑ Mínima tensión de entrada admisible para que la puerta interprete un «1» lógico.

C ❑ Mínima tensión que aparece en la salida para el estado lógico «1».

19.8 Calcula el nivel de ruido de una puerta lógica si en sus hojas de características se leen los siguientes datos:

$$V_{OH(mín)} = 2{,}6 \text{ V}; V_{IH(mín)} = 1{,}9 \text{ V}$$
$$V_{IL(máx)} = 0{,}9 \text{ V}; V_{OL(máx)} = 0{,}6 \text{ V}$$

19.9 ¿Qué familia lógica posee un menor consumo de potencia?

A ❑ RTL.

B ❑ TTL.

C ❑ CMOS.

19.10 Al número máximo de puertas que pueden conectarse a la salida de otra puerta de la misma familia lógica se le conoce como:

A ❑ Capacidad de carga.

B ❑ Fan-out.

C ❑ Número lógico.

19.11 Un retardo grande en la propagación de la señal en una puerta lógica nos indica que:

A ❑ Puede trabajar a una frecuencia más elevada.

B ❑ Es más rápida.

C ❑ Puede trabajar a una frecuencia de señal baja.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

19.12 La mayor escala de integración se consigue con la familia lógica:

A ❑ RTL.

B ❑ TTL.

C ❑ CMOS.

19.13 Calcula el valor decimal de los siguientes números binarios:

A ❑ 111111_2.

B ❑ 101010101_2.

C ❑ 10111_2.

19.14 Calcula el valor binario de los siguientes números decimales:

A ❑ 1.458_{10}.

B ❑ 324_{10}.

C ❑ 86_{10}.

19.15 Convierte los siguientes números en código binario:

A ❑ 246_8.

B ❑ 35674_8.

C ❑ $485C_{16}$.

D ❑ $5765A_{16}$.

E ❑ 10011001001000_{BCD}.

19.16 Convierte los siguientes números binarios en código, octal, hexadecimal y BCD

A ❑ 11001010.

B ❑ 1010101110.

19.17 Dibuja el símbolo de una puerta OR con cuatro entradas y escribe su tabla de la verdad. Haz lo mismo para una NOR, una AND, una NAND, una XOR y una XNOR de cuatro entradas.

19.18 Dibuja el diagrama lógico con puertas para que se cumpla la siguiente función de salida. Realiza también su tabla de la verdad.

$$S = \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C} + A \cdot \overline{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \overline{C}$$

19.19 Escribe la función de salida y la tabla de la verdad que se corresponde con el circuito lógico de la Figura 19.73.

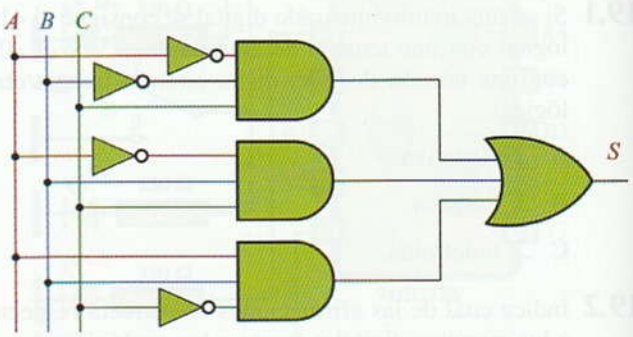
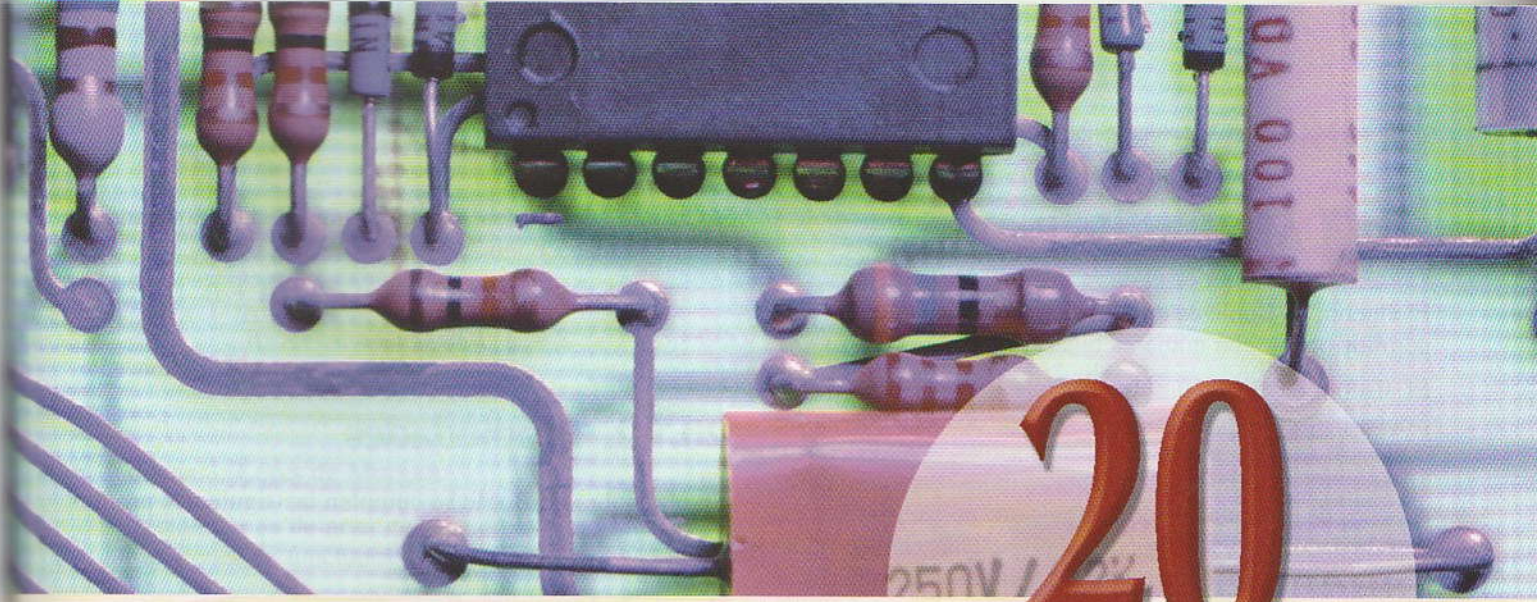


Figura 19.73.

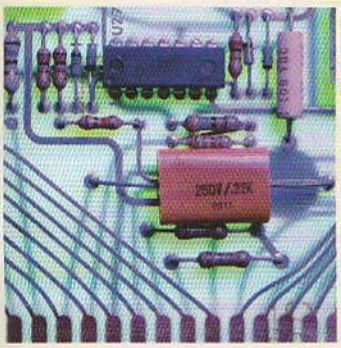
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



20

Diseño de circuitos con puertas lógicas



Con la combinación de varias puertas lógicas se pueden diseñar circuitos que sean capaces de dar respuesta a una necesidad práctica concreta a un sistema de automatización. Una vez obtenida la función de salida con la tabla de la verdad nos encontramos en ocasiones con circuitos que contienen un número demasiado elevado de puertas lógicas. Gracias al álgebra de Boole y a los mapas de Karnaugh que estudiaremos en esta unidad didáctica se pueden simplificar los circuitos al mínimo número de elementos, cabiendo la posibilidad, incluso, de llevarlo a cabo con un solo tipo de puerta lógica, como la NAND o la NOR.

Contenido

20.1. Álgebra de Boole
20.2. Simplificación algebraica de funciones lógicas
20.3. Simplificación de funciones lógicas mediante el mapa de Karnaugh
20.4. Diseño de circuitos combinacionales con puertas NAND y NOR
20.5. Diseño de circuitos combinacionales
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Utilizar el álgebra de Boole para el análisis y simplificación de una función lógica.
- Simplificar una función lógica mediante el mapa de Karnaugh.
- Diseñar circuitos combinacionales con puertas lógicas.
- Montar y verificar el funcionamiento de un circuito combinacional.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

20.1 Álgebra de Boole

El álgebra de Boole es una teoría matemática que nos va a permitir operar con números binarios.

El álgebra de Boole fue desarrollada en 1847 por George Boole, para resolver cuestiones de lógica deductiva, en las cuales se utilizan dos soluciones posibles, «verdadero» o «falso». Más adelante, este álgebra se utilizó para diseñar los circuitos de conmutación de telefonía que utilizaban relés. La llegada de los circuitos digitales hizo que el álgebra de Boole se convirtiese en indispensable para su diseño y análisis.

20.1.1. Postulados

Para explicar los postulados del álgebra de Boole nos vamos a ayudar del circuito eléctrico de contactos equivalentes, tal como se muestra en la Figura 20.1.

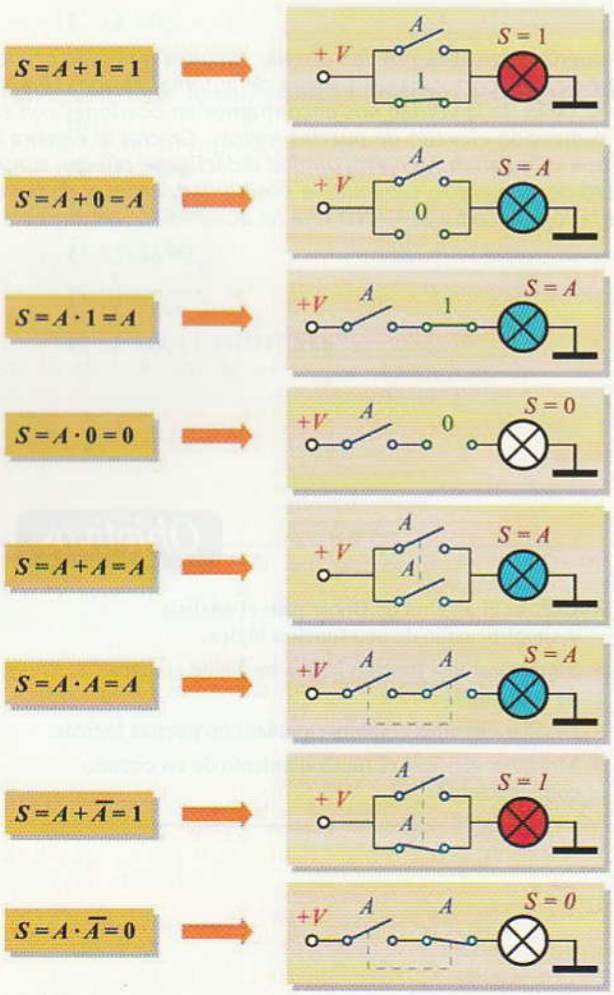


Figura 20.1. Postulados con sus circuitos de contactos equivalentes.

- Cuando se inverten los dos términos de una igualdad, ésta permanece igual:

$$S = A + B \text{ es igual a } \overline{S} = \overline{A + B}$$

$$S = A \cdot B \text{ es igual a } \overline{S} = \overline{A \cdot B}$$

20.1.2. Propiedades

En el álgebra de Boole se cumplen las siguientes propiedades:

Propiedad conmutativa

$$A + B = B + A$$

$$A \cdot B = B \cdot A$$

Propiedad asociativa

$$A + B + C = A + (B + C) = (A + B) + C$$

$$A \cdot B \cdot C = A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$$

Propiedad distributiva

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$$

20.1.3. Teoremas

Seguidamente se enuncian los teoremas más importantes y su demostración.

- Teorema 1

a) $A + A \cdot B = A$

Demostración:

$$A + A \cdot B = A \cdot (1 + B) = A \cdot 1 = A$$

b) $A \cdot (A + B) = A$

Demostración:

$$A \cdot (A + B) = A \cdot A + A \cdot B = A + A \cdot B = A$$

- Teorema 2

a) $A + \overline{A} \cdot B = A + B$

Demostración: Dado que el término $B + \overline{B} = 1$, si lo muliplicamos por el término A, la expresión no varía

$$S = A + \overline{A}B = A(B + \overline{B}) + \overline{A}B = AB + A\overline{B} + \overline{A}B$$

Dado que el término $AB = AB + AB$, si ahora sumamos a la expresión anterior un término AB, ésta no varía:

$$S = AB + A\overline{B} + \overline{A}B = AB + A\overline{B} + \overline{A}B + AB$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Reagrupando:

$$S = A + B$$

b) $A \cdot (\overline{A} + B) = A + B$

Demostración:

$$A \cdot (\overline{A} + B) = A \cdot \overline{A} + A \cdot B = 0 + A \cdot B = A \cdot B$$

- Teorema 3: **Leyes de Morgan**

Este teorema es de gran utilidad en la simplificación y conversiones de funciones

a) $\overline{A + B + C + \cdots + N} = \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} \cdot \cdots \cdot \overline{N}$

b) $\overline{A \cdot B \cdot C \cdot \cdots \cdot N} = \overline{A} + \overline{B} + \overline{C} + \cdots + \overline{N}$

20.2 Simplificación algebraica de funciones lógicas

Con la ayuda de los postulados, propiedades y teoremas del álgebra de Boole es posible simplificar una función lógica hasta su mínima expresión, con lo que se consigue construir circuitos lógicos más sencillos y económicos.

Actividad resuelta 20.1

Simplifica la siguiente función y realiza los diagramas lógicos antes y después de la simplificación:

a) $S = A \cdot (A \cdot B + C)$

El diagrama lógico de la función sin simplificar sería el de la Figura 20.2.

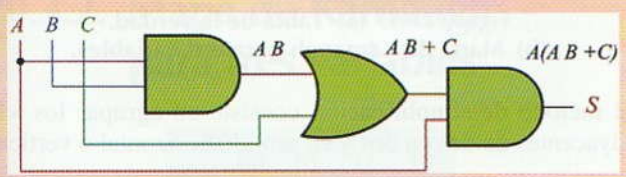


Figura 20.2. **Diagrama lógico sin simplificar.**

Solución:

$$S = A \cdot (A \cdot B + C) = A \cdot A \cdot B + A \cdot C = (A \cdot A) \cdot B + A \cdot C$$

Como $A \cdot A = A$, tenemos que:

$$S = A \cdot B + A \cdot C = A \cdot (B + C)$$

El diagrama lógico de la función simplificada es el de la Figura 20.3.

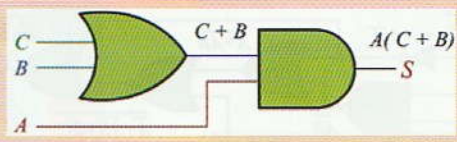


Figura 20.3. **Diagrama lógico simplificado.**

b) $S = A + \overline{A}B$

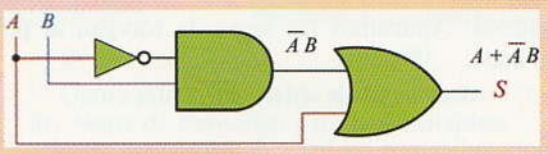


Figura 20.4. **Diagrama lógico sin simplificar.**

Solución: según el teorema 2.º:

$$A + \overline{A} \cdot B = A + B$$

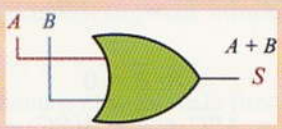


Figura 20.5. **Diagrama lógico simplificado.**

Actividad propuesta 20.1

Comprueba si la simplificación de las siguientes funciones es correcta y realiza los diagramas lógicos antes y después de simplificar.

a) $\overline{A}B + AB + B\overline{A} = B$

b) $\overline{A}(BC + AB + B\overline{A}) = \overline{A}B$

c) $ABC + CAB + AB + A = A$

d) $AB\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}C + A\overline{B} + C = A + C$

*** En www.paraninfo.es podrás consultar la solución a esta Actividad propuesta.*

Actividad resuelta 20.2

Simplifica la siguiente función y realiza los diagramas lógicos antes y después de la simplificación. Escribe la tabla de la verdad de la función una vez simplificada:

$$S = \overline{\overline{A} + \overline{AB} + BC + \overline{A}}$$

El diagrama lógico de la función sin simplificar sería el de la Figura 20.6.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

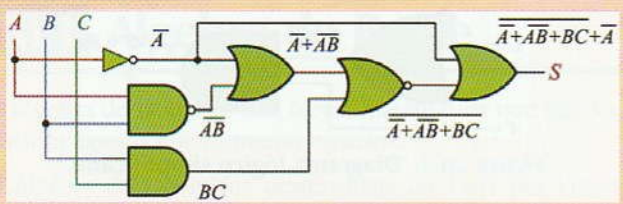


Figura 20.6. **Diagrama lógico sin simplificar.**

Solución: Aplicamos las leyes de Morgan al primer sumando:

$$S = A \cdot (AB) \cdot (\overline{BC}) + \overline{A}$$

Ahora aplicamos las leyes de Morgan al término $(\overline{BC})$

$$S = A(AB)(\overline{B} + \overline{C}) + \overline{A}$$

$$S = AAB(\overline{B} + \overline{C}) + \overline{A}$$

Dado que $A \cdot A = A$:

$$S = AB(\overline{B} + \overline{C}) + \overline{A} = AB\overline{B} + AB\overline{C} + \overline{A}$$

Como

$$B \cdot \overline{B} = 0$$

$$S = AB\overline{C} + \overline{A} = A(B\overline{C}) + \overline{A}$$

Aplicando el teorema 2: $S = B\overline{C} + A$.

En la Figura 20.7 se muestra el diagrama lógico simplificado.

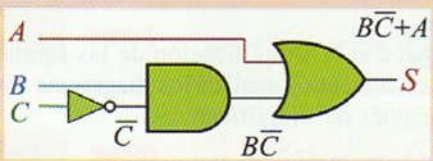


Figura 20.7. **Diagrama lógico simplificado.**

20.3 Simplificación de funciones lógicas mediante el mapa de Karnaugh

Dado que la simplificación por el método algebraico resulta largo, complejo y poco sistemático se han ideado otros métodos de simplificación más sencillos como el de Karnaugh. Este método es bastante sencillo, sobre todo si lo aplicamos para 2, 3 o 4 variables de entrada.

El mapa está formado por una tabla de 2^n celdas, siendo n el número de variables que posea la función a simplificar.

20.3.1. Mapa de Karnaugh para dos variables

Para dos variables dibujaremos una tabla con $2^2 = 4$ celdas, donde se escribirá el resultado de la función canónica o los términos de la tabla de la verdad que den como resultado un «1» lógico en su salida.

En la Figura 20.8 se muestra la ubicación de cada uno de los términos en las celdas de un mapa de Karnaugh para dos variables.

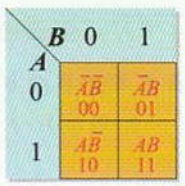


Figura 20.8. **Mapa de Karnaugh para dos variables.**

Así, por ejemplo, para la siguiente función, la tabla de la verdad y el mapa de Karnaugh sería el que se representa en la Figura 20.9.

$$S = AB + \overline{A}B$$

En el mapa se escriben solamente el «1» lógico de cada uno de los términos de la función de salida en la celda correspondiente del mapa de Karnaugh.

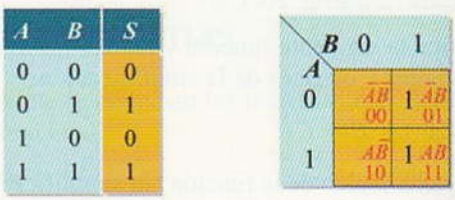


Figura 20.9. **(a) Tabla de la verdad. (b) Mapa de Karnaugh para dos variables.**

El método de simplificación consiste en agrupar los «1» adyacentes de dos en dos y en sentido horizontal o vertical.

Para una función de dos variables si se consiguen dos «1» adyacentes se puede eliminar una de las variables.

La variable que se mantiene es aquélla que no cambia de valor en la agrupación de unos adyacentes, eliminándose la que cambia.

En nuestro ejemplo de la Figura 20.9, la variable que no cambia de valor es la B ya que en las dos celdas adyacentes con «1» su valor siempre es 1; sin embargo, la variable A toma el valor 0 en una celda y 1 en la otra, por lo que la simplificación de la función queda así (Figura 20.10):

$$S = B$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

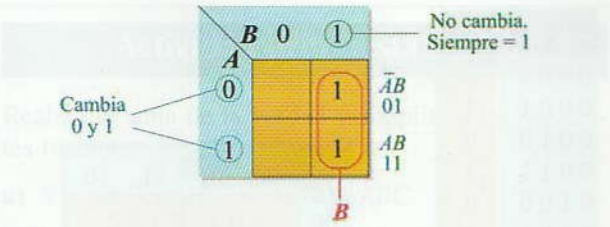


Figura 20.10. Simplificación con mapa de Karnaugh.

Actividad resuelta 20.3

Escribe la tabla de la verdad y simplifica la siguiente función de salida:

$$S = A\bar{B} + AB + \bar{A}B$$

Solución: Figura 20.11.

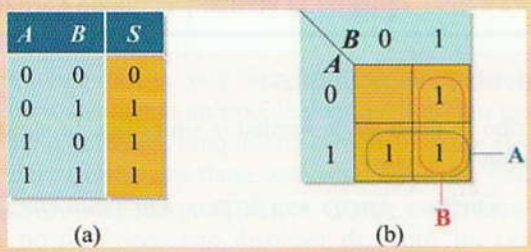


Figura 20.11. (a) Tabla de la verdad. (b) Mapa de Karnaugh.

La función simplificada quedaría así:

$$S = A + B$$

20.3.2. Mapa de Karnaugh para tres variables

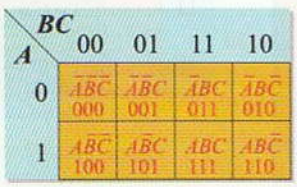


Figura 20.12. Mapa de Karnaugh para tres variables.

Así, por ejemplo, para la siguiente función, la tabla de la verdad y el mapa de Karnaugh sería el que se representa en la Figura 20.13.

$$S = \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + \bar{A}B\bar{C} + AB\bar{C}$$

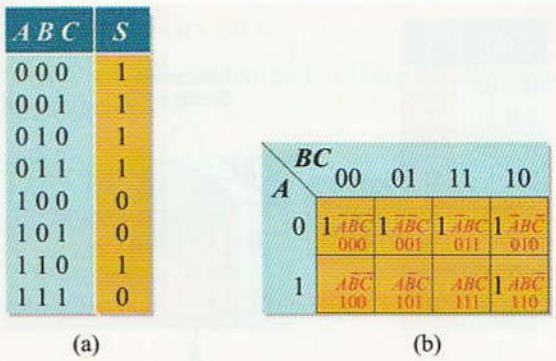


Figura 20.13. (a) Tabla de la verdad. (b) Mapa de Karnaugh para tres variables.

Para una función de tres variables si se consigue:

- Dos «1» adyacentes, se puede eliminar una de las variables.
- Cuatro «1» adyacentes, se puede eliminar dos de las variables.
- Ocho «1» adyacentes, el valor de la función es siempre 1.

Recuerda que la variable que se mantiene es aquélla que no cambia de valor en la agrupación de unos adyacentes, eliminándose la que cambia.

La simplificación de la función es la que se muestra en la Figura 20.14.

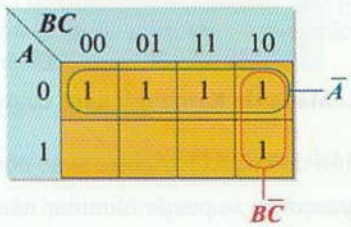


Figura 20.14. Simplificación con mapa de Karnaugh.

La función simplificada queda así:

$$S = \bar{A} + B\bar{C}$$

Actividad resuelta 20.4

Escribe la tabla de la verdad y simplifica la siguiente función de salida:

$$S = \bar{A}\bar{B}\bar{C} + \bar{A}\bar{B}C + A\bar{B}\bar{C} + A\bar{B}C$$

Solución: Figura 20.15.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

A B C	S
0 0 0	1
0 0 1	1
0 1 0	0
0 1 1	0
1 0 0	1
1 0 1	1
1 1 0	0
1 1 1	0

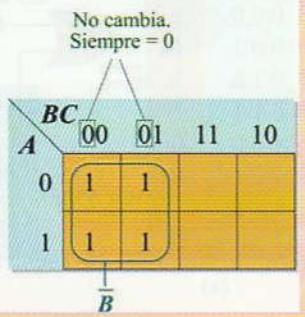


Figura 20.15. (a) Tabla de la verdad. (b) Mapa de Karnaugh.

La función simplificada quedaría así:

$$S = \overline{B}$$

20.3.3. Mapa de Karnaugh para cuatro variables

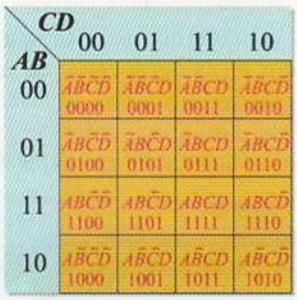


Figura 20.16. Mapa de Karnaugh para cuatro variables.

Para una función de cuatro variables si se consigue:

- Dos «1» adyacentes, se puede eliminar una de las variables.
- Cuatro «1» adyacentes, se puede eliminar dos de las variables.
- Ocho «1» adyacentes, se puede eliminar tres de las variables.
- 16 «1» adyacentes, el valor de la función es siempre 1.

Así, por ejemplo, para la siguiente función, la tabla de la verdad y el mapa de Karnaugh sería el que se representa en la Figura 20.17.

$$S = \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BCD + ABCD + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}CD$$

La función simplificada queda así:

$$S = \overline{A}D + A\overline{B}C + CD$$

A B C D	S
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	0
0 0 1 1	1
0 1 0 0	0
0 1 0 1	1
0 1 1 0	0
0 1 1 1	1
1 0 0 0	0
1 0 0 1	0
1 0 1 0	1
1 0 1 1	1
1 1 0 0	0
1 1 0 1	0
1 1 1 0	0
1 1 1 1	1

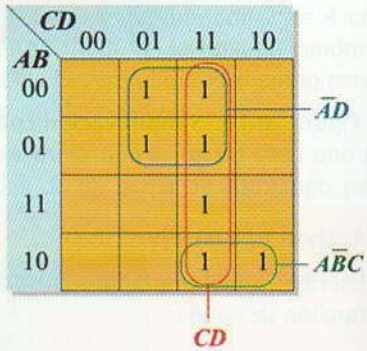


Figura 20.17. Tabla de la verdad y mapa de Karnaugh.

Actividad resuelta 20.5

Escribe la tabla de la verdad y simplifica la siguiente función de salida:

$$S = \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}BCD + \overline{A}BC\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}D + A\overline{B}CD + AB\overline{C}D + ABCD$$

Solución: Figura 20.18.

A B C D	S
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	1
0 0 1 1	1
0 1 0 0	0
0 1 0 1	0
0 1 1 0	1
0 1 1 1	1
1 0 0 0	0
1 0 0 1	1
1 0 1 0	0
1 0 1 1	1
1 1 0 0	0
1 1 0 1	1
1 1 1 0	0
1 1 1 1	1

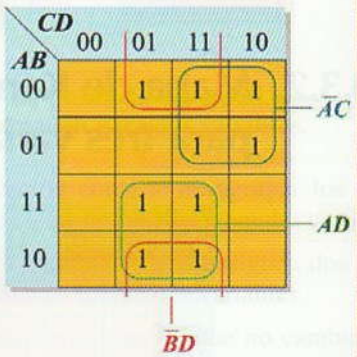


Figura 20.18. Tabla de la verdad y mapa de Karnaugh.

La función simplificada quedaría así:

$$S = \overline{A}C + AD + \overline{B}D$$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad propuesta 20.2

Realiza la tabla de la verdad y simplifica las siguientes funciones:

a) $S = \bar{A}B\bar{C} + A\bar{B}C + A\bar{B}\bar{C} + ABC$

b) $S = A\bar{B}\bar{C}D + A\bar{B}C\bar{D} + \bar{A}\bar{B}CD + \bar{A}B\bar{C}D +$
$+ \bar{A}B\bar{C}\bar{D} + A\bar{B}\bar{C}D + A\bar{B}CD + AB\bar{C}D + ABCD$

*** En www.paraninfo.es podrás consultar la solución a esta Actividad propuesta.*

20.4 Diseño de circuitos combinacionales con puertas NAND y NOR

En la práctica resulta muy útil el utilizar en nuestros diseños lógicos solamente un tipo de puerta, como por ejemplo la NAND o la NOR. Aunque esta acción aumenta el número de puertas utilizadas tiene sus ventajas, ya que podemos aprovechar todas las puertas que vienen integradas en el chip y no será necesario disponer de todos los tipos de puertas para realizar un diseño.

Para las conversiones se utilizan las leyes de Morgan. En la Figura 20.19 se muestra, como ejemplo, las equivalencias de las puertas NAND.

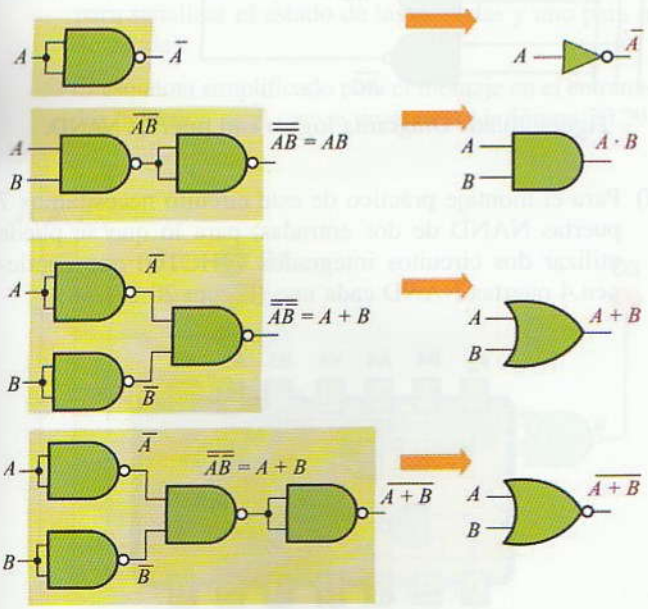


Figura 20.19. Equivalencias de diferentes funciones lógicas con puertas NAND.

Actividad resuelta 20.6

Diseña el circuito lógico de la Figura 20.20 mediante sólo puertas NAND.

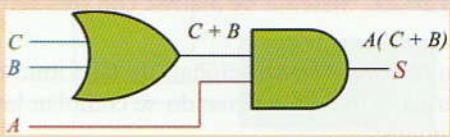


Figura 20.20.

Solución: Aplicando las leyes de Morgan u observando las equivalencias de la Figura 20.19 llegamos al diagrama de la Figura 20.21.

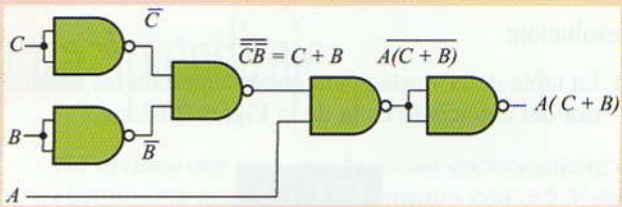


Figura 20.21. Diagrama lógico con puertas NAND.

20.5 Diseño de circuitos combinacionales

El diseño de un circuito combinacional con puertas lógicas que dé solución a un determinado caso práctico constaría de las siguientes fases:

a) Enunciado del problema.

b) Escribir la tabla de la verdad a partir del enunciado.

c) Obtención de la función que se corresponda con la salida que dé como resultado un «1» lógico.

d) Simplificación de la función.

e) Conversión de las funciones, si conviene, para el uso exclusivo de puertas NAND o NOR.

f) Realización del diagrama lógico con puertas.

g) Selección de los circuitos integrados.

h) Montaje práctico del circuito.

A continuación vamos a llevar a cabo el diseño de un sistema de alarma que nos sirva como ejemplo del procedimiento a seguir.

Se dispone de una alarma (S) y de tres sensores A, B y C para su activación (Figura 20.22).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Figura 20.22. Sistema de alarma con tres sensores.

Diseña un circuito combinacional, de tal forma que la señal de alarma (S) se active cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- El sensor A desactivado, el B activado y el C en cualquier posición.
- Los sensores A y B desactivados y el C activado.
- Todos los sensores activados.

Resolución:

a) La tabla de la verdad para que se cumplan las condiciones del enunciado es la de la Figura 20.23.

$A\,B\,C$	S
0 0 0	0
0 0 1	1
0 1 0	1
0 1 1	1
1 0 0	0
1 0 1	0
1 1 0	0
1 1 1	1

Figura 20.23. Tabla de la verdad.

b) La función lógica en forma canónica para $S = 1$, será:

$$S = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + \overline{A}BC + ABC$$

c) Simplificamos la función con el mapa de Karnaugh de la Figura 20.24.

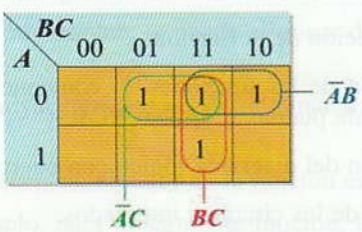


Figura 20.24. Mapa de Karnaugh.

La función simplificada queda así:

$$S = \overline{A}B + \overline{A}C + BC$$

d) Para esta función el diagrama lógico es el que se presenta en la Figura 20.25.

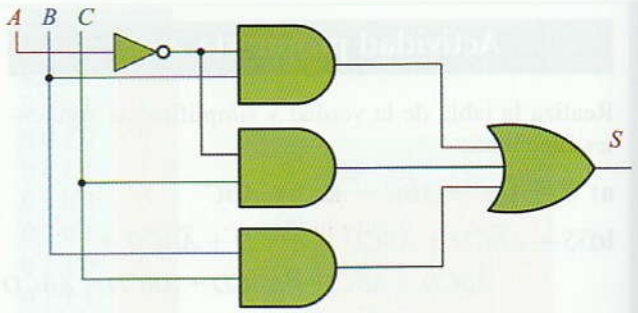


Figura 20.25. Diagrama lógico de la función simplificada.

e) Vamos a convertir el circuito para utilizar sólo puertas NAND. Para ello aplicamos el teorema de Morgan a la función simplificada.

$$S = \overline{\overline{A}B + \overline{A}C + BC} = \overline{\overline{A}B \cdot \overline{A}C \cdot \overline{BC}}$$

Si queremos utilizar solamente puertas NAND de dos entradas será necesario volver a aplicar el teorema de Morgan.

$$S = \overline{\overline{A}B \cdot \overline{A}C \cdot \overline{BC}}$$

El diagrama lógico correspondiente con puertas NAND es el que se muestra en la Figura 20.26.

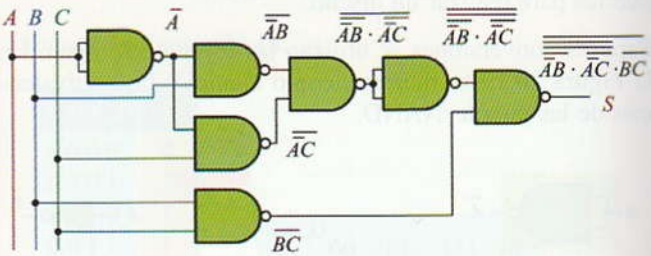


Figura 20.26. Diagrama lógico con puertas NAND.

f) Para el montaje práctico de este circuito necesitamos 7 puertas NAND de dos entradas, para lo que se puede utilizar dos circuitos integrados 74HCT00 que contienen 4 puertas NAND cada uno (Figura 20.27).

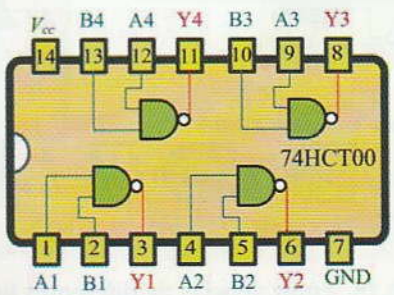


Figura 20.27. CI 74HCT00 con cuatro puertas NAND.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividad propuesta 20.3

Una planta depuradora dispone de tres depósitos de agua. En el fondo de cada depósito se dispone de un sensor de nivel que se activará cuando se encuentre vacío. Diseña el circuito lógico con puertas NAND de tal forma que se active una señal de aviso cuando los sensores indiquen que dos depósitos están vacíos (Figura 20.28).

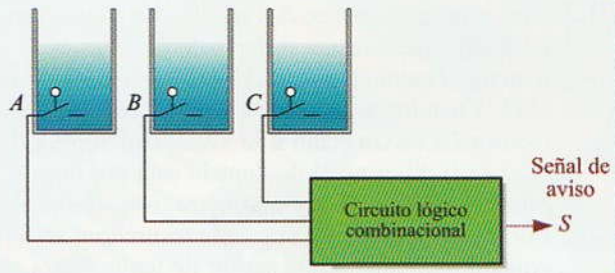


Figura 20.28. Diseño de circuito lógico para planta depuradora.

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

20.1 Sistema de alarma con tres sensores. Se trata de que compruebes de forma práctica el diseño del circuito combinacional de la alarma con tres sensores realizado como ejemplo en el apartado 20.5 (Figuras 20.22 y 20.26).

Para el montaje práctico utilizaremos un entrenador didáctico, como el *Universal Trainer*, y serán necesarios dos circuitos integrados 74HCT00 (4 puertas NAND de dos entradas) y la utilización de tres conmutadores (A, B y C) y de cuatro diodos LED (tres para señalizar el estado de las entradas y uno para el de salida).

El esquema simplificado para el montaje en el entrenador didáctico es el que se propone en la Figura 20.29.

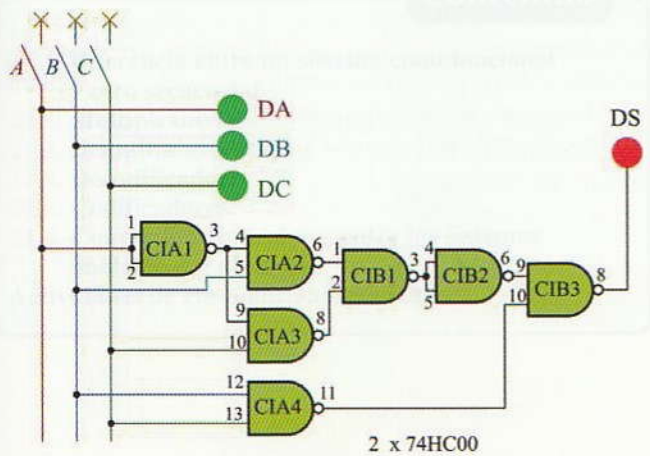


Figura 20.29. Esquema simplificado del circuito de alarma en el entrenador didáctico.

No olvides que para que funcione correctamente el circuito será necesario que alimentes con +5 V ambos circuitos integrados.

20.2 Sistema de automatización de una planta depuradora. Realiza el montaje práctico en el entrenador didáctico del circuito lógico que has diseñado en la Actividad propuesta 20.3 y comprueba su funcionamiento. Antes de llevarlo a cabo realiza una lista con los componentes que serán necesarios y dibuja un esquema simplificado para realizar su montaje.

AUTOEVALUACIÓN

20.1 Simplifica las siguientes funciones y realiza los diagramas lógicos antes y después de la simplificación.

A ❑ $S = A\overline{B} + \overline{A}\,\overline{B} + \overline{A}B.$

B ❑ $S = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C} + \overline{A}\,\overline{B}C + A\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + AB\overline{C}.$

C ❑ $S = ABC + \overline{A}\,\overline{B}C + \overline{A}BC + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\,\overline{C}.$

D ❑ $S = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}D + \overline{A}\,\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BCD + ABCD.$

E ❑ $S = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}D + \overline{A}\,\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + + ABCD + A\overline{B}C\overline{D}.$

20.2 Convierte las siguientes funciones para que puedan ser realizadas sólo con puertas NAND de dos entradas. Una vez realizada la conversión dibuja los diagramas lógicos.

A ❑ $S = \overline{A} + B\overline{C}.$

B ❑ $S = \overline{A}C + AD + \overline{B}D.$

C ❑ $S = \overline{A}D + A\overline{B}C + CD.$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

20.3 Una trituradora posee dos niveles de trituración, de tal forma que cuando el depósito de trituración está a un nivel medio (sensor *B*) se conecta el motor n.º 1 (*S*1). Cuando se alcanza un nivel de llenado alto (sensor *C*) se conectan a la vez los motores n.º 1 y n.º 2 (*S*2). Si el nivel de llenado está por debajo del mínimo (sensor *A*) los dos motores se desconectan. Por otro lado, los motores de la trituradora sólo funcionarán si se activa un sensor de temperatura (sensor *D*) que indica que la mezcla se realiza a 50 °C. (Véase Figura 20.30.)

Escribe la tabla de la verdad y diseña el circuito lógico combinacional con puertas lógicas para el funcionamiento de los dos motores de la trituradora.

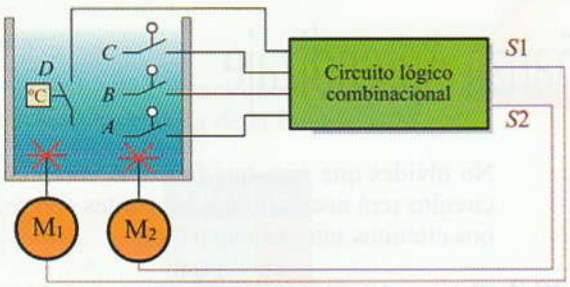


Figura 20.30. Automatización de una trituradora.

20.4 Se dispone de una alarma (*S*) de cuatro sensores *A*, *B*, *C* y *D* para su activación (Figura 20.31).

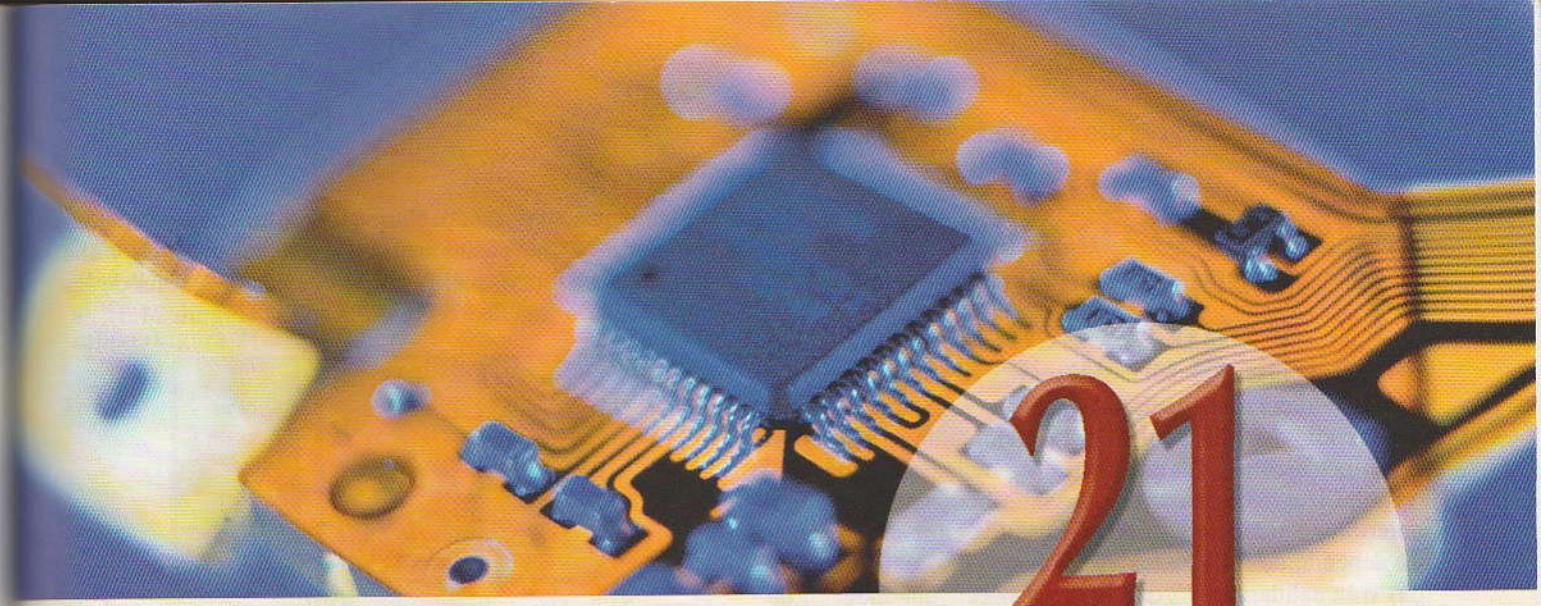
Figura 20.31. Sistema de alarma con cuatro sensores.

Diseña el circuito combinacional de tal forma que la señal de alarma (*S*) se active cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- El sensor *A* desactivado, el *B* activado, el *C* desactivado y el *D* en cualquier posición.
- Los sensores *A* y *B* desactivados y el *C* y el *D* activados.
- El sensor *A* activado, el *B* desactivado, el *C* desactivado y el *D* activado.
- Todos los sensores activados.

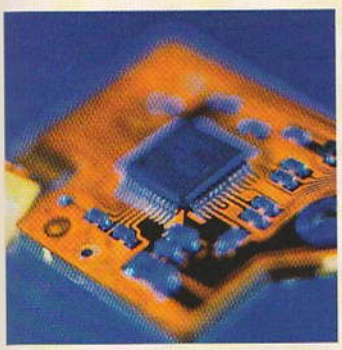
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



21

Bloques combinacionales en escala de integración media (MSI)



En la práctica resulta muy útil la integración de un gran número de puertas lógicas interconectadas con el fin de conseguir un bloque combinacional, agrupado en un solo chip que cumpla con un fin específico. Nos referimos a circuitos de integración media que contienen un número de puertas lógicas comprendidas entre 12 y 100. En esta unidad didáctica estudiaremos algunos de estos circuitos que se exponen a continuación:

- *Multiplexores.*
- *Demultiplexores.*
- *Codificadores.*
- *Decodificadores.*

Para completar esta unidad didáctica se ha incluido también el estudio de los convertidores de datos entre los sistemas analógicos y digitales, como son:

- *El convertidor digital/analógico.*
- *El convertidor analógico/digital.*

Contenido

21.1. Diferencia entre un sistema combinacional y otro secuencial
21.2. Multiplexores
21.3. Demultiplexores
21.4. Decodificadores
21.5. Codificadores
21.6. Convertidores de datos entre los sistemas analógicos y digitales
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Describir la diferencia entre circuitos combinacionales y secuenciales.
- Interpretar la función de un multiplexor, un demultiplexor, un codificador y un decodificador.
- Generar una función lógica con un multiplexor y con un decodificador.
- Montar y verificar el funcionamiento de un multiplexor, un demultiplexor, un codificador y un decodificador.
- Realizar procesos de conversión de datos entre sistemas analógicos y digitales mediante convertidores A/D y convertidores D/A.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.1 Diferencia entre un sistema combinacional y otro secuencial

Los **sistemas combinacionales** se caracterizan porque sus salidas sólo dependen del valor que adquieran sus entradas, como por ejemplo, las puertas lógicas y los circuitos lógicos construidos a partir de ellas que hemos estudiado en anteriores unidades didácticas. En estos circuitos la salida no depende de los estados anteriores que posean las entradas o la salida, por lo que se puede decir que carecen de realimentación o de memoria.

A diferencia de los **sistemas secuenciales**, que estudiaremos en la siguiente unidad didáctica, los valores de las salidas en un determinado momento dependen no solamente de las entradas en ese momento, sino del estado en que se encuentra el sistema, el cual depende de los valores de las entradas en momentos anteriores, lo que indica que los circuitos secuenciales poseen memoria.

Los circuitos secuenciales son capaces de «recordar» números que han recibido anteriormente.

Figura 21.1. En un circuito combinacional las salidas sólo dependen del valor que posean sus entradas en ese instante.

21.2 Multiplexores

Un circuito multiplexor es un circuito que permite seleccionar cuál de varias líneas de entrada de datos debe aparecer en una única línea de salida, según la configuración presente en unas líneas de control o entradas de selección (Figura 21.2).

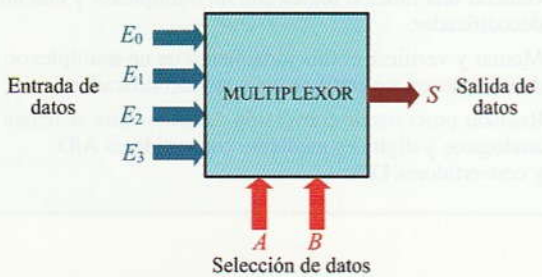


Figura 21.2. El multiplexor permite seleccionar cuál de las entradas aparecerá en la salida.

Básicamente, se podría decir que un multiplexor es un conmutador de varias posiciones con diferentes entradas y una salida, de tal forma que, al situar el selector en una de las entradas, sólo ésta aparecerá en la salida (Figura 21.3).

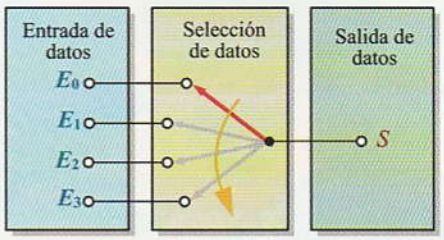


Figura 21.3. Un multiplexor es similar a un conmutador.

Los multiplexores son circuitos lógicos muy utilizados. Su principal aplicación es el envío, en serie, de una forma ordenada, y a través de una sola línea de salida, de varias informaciones digitales que pueden aparecer simultáneamente en distintas entradas. Como ejemplo tenemos el envío de información de un ordenador a otro, envío de una comunicación telefónica, etc.

Para que lo entiendas mejor, imagina que deseas que 16 líneas de teléfono se transmitan por un solo cable. Para lo cual instalas un conmutador telefónico con un multiplexor. Si por ejemplo, deseas que los datos de la línea n.º 7 (0111 en base 2) aparezcan en la salida del multiplexor tendrás que aplicar dicho código (0111) a las entradas de selección.

21.2.1. Diseño de un multiplexor de dos entradas

El número de entradas de selección (n) de un multiplexor depende del número de canales de entrada, de tal forma que se cumpla la siguiente expresión:

$$\text{Número de canales de entrada} = 2^n$$

De esta forma necesitaremos de una entrada de selección para dos entradas, dos para cuatro entradas, tres para ocho entradas, cuatro para dieciséis entradas, etc.

Para el diseño de un multiplexor de dos entradas (E_0, E_1) necesitaremos de una entrada de selección (A), tal como se muestra en la Figura 21.4.

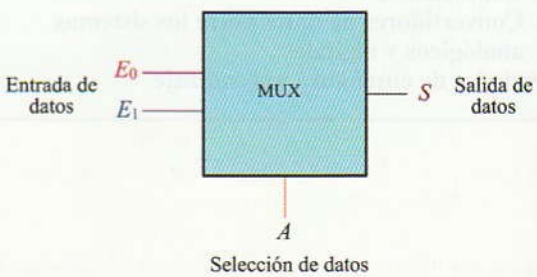


Figura 21.4. Multiplexor de dos entradas.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Para realizar la tabla de la verdad tendremos en cuenta que cuando la entrada de selección A posea el valor «0» aparecerá el valor de la entrada E_0 en la salida, y cuando posea el valor «1» será el valor de la entrada E_1 el que alcance la salida (Figura 21.5).

A	E_0	E_1	S
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Figura 21.5. Tabla de la verdad de un multiplexor de dos entradas.

De la tabla de la verdad se obtiene la siguiente función lógica:

$$S = \overline{A}E_0\overline{E_1} + \overline{A}E_0E_1 + A\overline{E_0}E_1 + AE_0E_1$$

Comprueba cómo aplicando la simplificación con el mapa de Karnaugh la función queda así:

$$S = E_0\overline{A} + E_1A$$

El diagrama lógico con puertas con el que se consigue llevar a cabo esta función es el de la Figura 21.6.

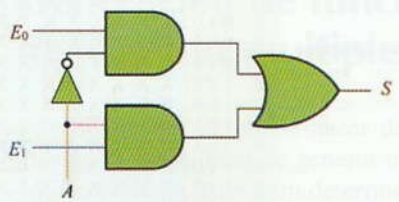


Figura 21.6. Diagrama lógico de un multiplexor de dos entradas.

En la práctica, sería más sencillo realizar este circuito con puertas NAND, tal como se muestra en la Figura 21.7.

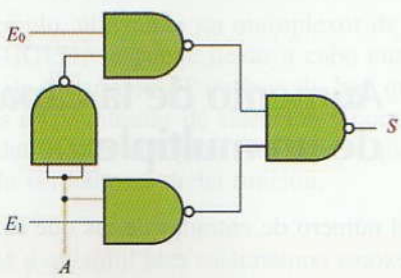


Figura 21.7. Diagrama lógico de un multiplexor de dos entradas con puertas NAND.

Con este multiplexor hemos conseguido que cuando deseamos que aparezca la señal E_0 en la salida basta con aplicar un «0» lógico a la entrada de selección A, mientras que si deseamos que sea la entrada E_1 la que aparezca en la salida tendremos que aplicar un «1» lógico a dicha entrada de selección.

21.2.2. Diseño de un multiplexor de cuatro entradas

Siguiendo el mismo procedimiento de diseño que para dos entradas, podríamos diseñar un multiplexor de cuatro entradas, para lo cual necesitamos de dos entradas de selección. En la Figura 21.8 se muestra la tabla de la verdad correspondiente a un multiplexor de cuatro entradas (E_0, E_1, E_2, E_3) y dos entradas de selección (A, B).

A	B	E_0	E_1	E_2	E_3	S
0	0	0	X	X	X	0
0	0	1	X	X	X	1
0	1	X	0	X	X	0
0	1	X	1	X	X	1
1	0	X	X	0	X	0
1	0	X	X	1	X	1
1	1	X	X	X	0	0
1	1	X	X	X	1	1

Figura 21.8. Tabla de la verdad para un multiplexor de cuatro entradas.

En esta tabla de la verdad no se han escrito todas las combinaciones posibles para seis bits, ya que la condición es que aparecerá en la salida S sólo la entrada que haya sido seleccionada con la entrada de selección, colocando una X para aquellos valores de entrada que son indiferentes (da igual que sea «1» o «0»). De esta forma, si los dos bits de la entrada de selección AB son:

- 00 aparece el valor de E_0 en la salida
- 01 aparece el valor de E_1 en la salida
- 10 aparece el valor de E_2 en la salida
- 11 aparece el valor de E_3 en la salida

El diagrama lógico para llevar a cabo este multiplexor con puertas NAND sería el que se muestra en la Figura 21.9.

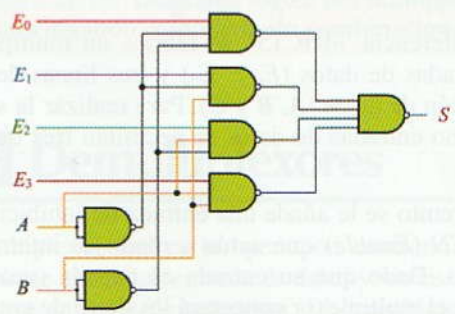


Figura 21.9. Diagrama lógico de un multiplexor de cuatro entradas con puertas NAND.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.2.3. El multiplexor como bloque combinacional

Tal como ya habíamos expuesto al principio de esta unidad didáctica, el circuito de un multiplexor se puede integrar en un solo bloque dentro de un circuito integrado específico. Así, por ejemplo, para un multiplexor de cuatro entradas, como el de la Figura 21.9 integrado en un solo chip, el circuito a utilizar podría ser el de la Figura 21.10.

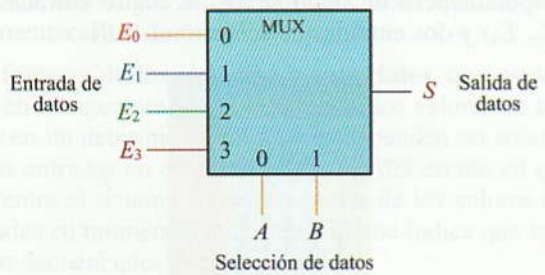


Figura 21.10. Multiplexor de cuatro entradas como bloque combinacional.

En la Figura 21.11 se muestra cómo los datos de entrada se presentan en la salida en función de los bits que se introduzcan por las entradas de selección.

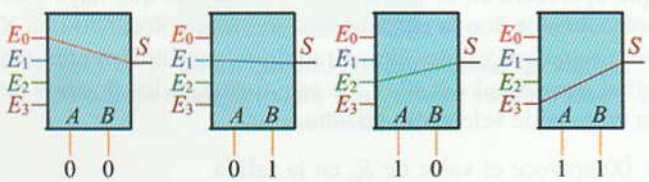
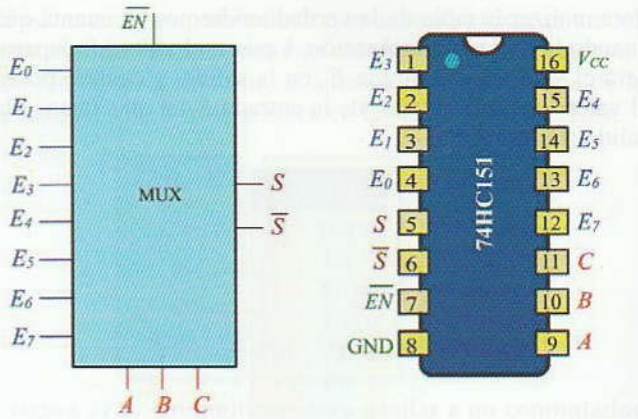


Figura 21.11. Conmutación de la señales de entrada en un multiplexor.

21.2.4. Multiplexor MSI de ocho entradas

Con la referencia 74HC151 se fabrica un multiplexor de ocho entradas de datos ($E_0 - E_7$) y tres líneas de entrada de selección de datos (A, B y C). Para realizar la selección de las ocho entradas de datos se necesitan tres bits (Figura 21.12).

A este circuito se le añade una entrada de inhibición-habilitación *EN* (*Enable*) que actúa a modo de interruptor de encendido. Dado que su entrada es negada (veáse Figura 21.12), el multiplexor conectará los datos de entrada con la salida si a este terminal le introducimos un «0» lógico, y los desconectará si lo hacemos con «1».



(a) Símbolo lógico b) Diagrama de conexiónes del CI

Figura 21.12. Multiplexor de 8 entradas 74HC151.

Este multiplexor dispone de una salida de datos (S) y de su negada ($\overline{S}$) con el fin de utilizar la que más convenga en función de las especificaciones del diseño. En la Figura 21.13 se expone su tabla de la verdad.

	$\overline{EN}$	A	B	C	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	S	$\overline{S}$
Multiplexor habilitado	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	0	1
	0	0	0	0	1	X	X	X	X	X	X	X	1	0
	0	0	0	1	X	0	X	X	X	X	X	X	0	1
	0	0	0	1	X	1	X	X	X	X	X	X	1	0
	0	0	1	0	X	X	0	X	X	X	X	X	0	1
	0	0	1	0	X	X	1	X	X	X	X	X	1	0
	0	0	1	1	X	X	X	0	X	X	X	X	0	1
	0	0	1	1	X	X	X	1	X	X	X	X	1	0
	0	1	0	0	X	X	X	X	0	X	X	X	0	1
	0	1	0	0	X	X	X	X	1	X	X	X	1	0
	0	1	0	1	X	X	X	X	X	0	X	X	0	1
	0	1	0	1	X	X	X	X	X	1	X	X	1	0
	0	1	1	0	X	X	X	X	X	X	0	X	0	1
	0	1	1	0	X	X	X	X	X	X	1	X	1	0
	0	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	0	0	1
	0	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	1	1	0
Multiplexor inhabilitado	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	1

Figura 21.13. Tabla de la verdad del multiplexor 74HC151.

21.2.5. Aumento de la capacidad de un multiplexor

Dado que el número de entradas de las que se dispone en los multiplexores comerciales está limitado a 16 y 4 líneas de selección de datos, para poder aumentar la capacidad de un multiplexor es posible interconectar varios entre sí. Así, por ejemplo, para aumentar la capacidad de un multiplexor de 4 entradas hasta 16, sería necesario interconectar 4 unidades tal como se muestra en la Figura 21.14.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

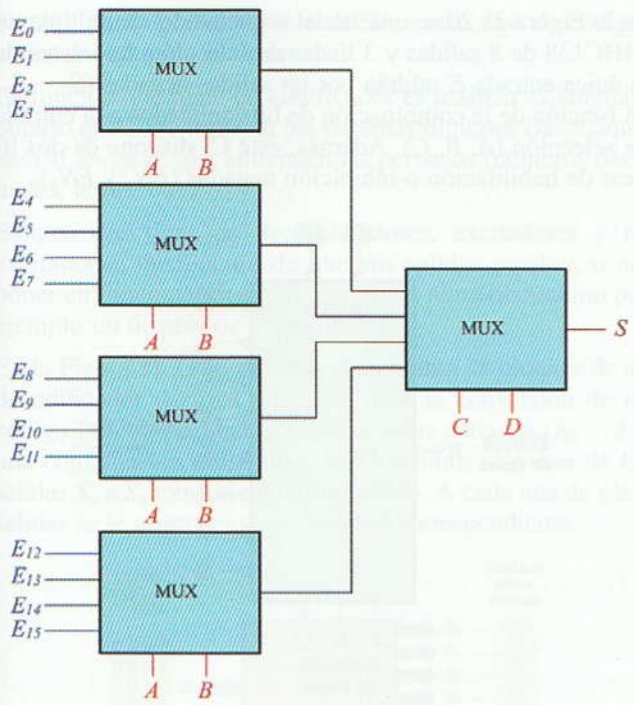


Figura 21.14. Multiplexor de 16 entradas construido con multiplexores de 4 entradas.

21.2.6. Generación de funciones lógicas con multiplexores

Una aplicación práctica que se puede hacer de los multiplexores consiste en la posibilidad de generar una determinada función lógica perteneciente a un determinado circuito combinacional, siempre y cuando ésta se presente como suma de productos. De esta forma podemos construir un circuito lógico de una manera más sencilla y sin tener que utilizar puertas, reduciendo considerablemente el número de circuitos integrados.

Así, por ejemplo, utilizando un multiplexor de 8 entradas, como el 74HC151, se puede llevar a cabo cualquier función lógica de 3 variables. Para hacerlo hay que conectar las variables a las entradas de selección y conectar a cada entrada de datos el nivel lógico («0» o «1») que resulte en la tabla de la verdad para dicha función.

Actividad resuelta 21.1

Diseña un circuito combinacional con un multiplexor de 8 entradas para la alarma con tres sensores que diseñamos en el apartado 20.5 de la unidad didáctica anterior.

La tabla de la verdad resultante para este circuito resulta ser la de la Figura 21.15

A B C	S	
0 0 0	0	— E_0
0 0 1	1	— E_1
0 1 0	1	— E_2
0 1 1	1	— E_3
1 0 0	0	— E_4
1 0 1	0	— E_5
1 1 0	0	— E_6
1 1 1	1	— E_7

Figura 21.15. Tabla de la verdad.

La función lógica que responde a esta tabla será:

$$S = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}C + ABC$$

Ahora conectamos las entradas del multiplexor al nivel lógico resultante de la tabla de la verdad ($E_0 = 0$, $E_1 = 1$, $E_2 = 1$, $E_3 = 1$, $E_4 = 0$, $E_5 = 0$, $E_6 = 0$, $E_7 = 1$). Una forma sencilla de hacerlo es conectar las entradas con un nivel lógico «1» a la tensión de alimentación V_{CC} y a masa las que posean el nivel lógico «0», tal como se muestra en la Figura 21.16.

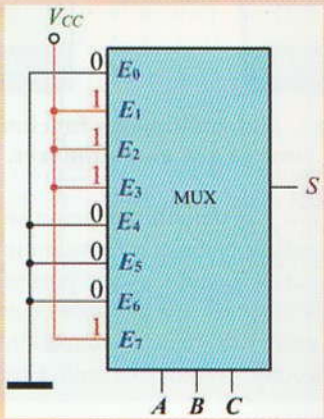


Figura 21.16. Diagrama lógico del multiplexor funcionando como circuito combinacional.

21.3 Demultiplexores

Un demultiplexor realiza la operación contraria al multiplexor, posee una única entrada de datos y varias salidas de datos con n entradas de selección. El demultiplexor lleva los datos de la entrada a una determinada salida según la configuración en las entradas de selección.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

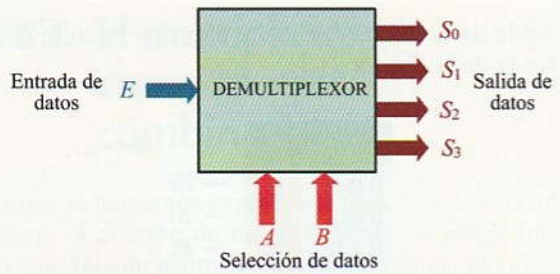


Figura 21.17. El demultiplexor permite seleccionar en qué salida aparecerán los datos presentes en la entrada.

Al demultiplexor se le puede comparar también con un conmutador que es capaz de seleccionar dónde aparecerán lo datos de la entrada. En la Figura 21.18 se muestra el símil con conmutadores de selección de un multiplexor conectado con un demultiplexor. Los datos de entrada del multiplexor pasan a una sola línea de transmisión de salida por donde transcurren todos los datos. El demultiplexor retoma estos datos y los vuelve a canalizar por diferentes salidas.

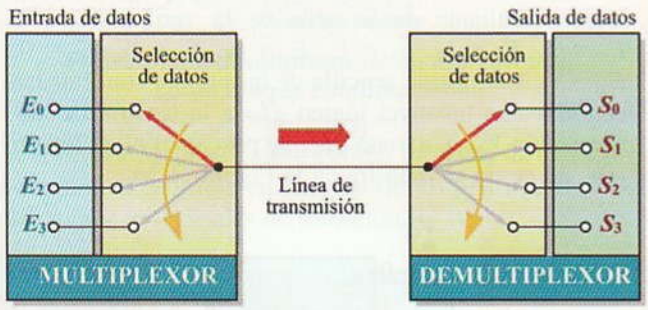


Figura 21.18. El demultiplexor funciona de forma inversa que el multiplexor.

La multiplexación y la demultiplexación se pueden utilizar para transmitir información a través de una línea de datos procedente de varias fuentes y que posteriormente se envían a diferentes destinos. Un ejemplo de esto podría ser la comunicación entre diferentes ordenadores a través del puerto serie, tal como se muestra en la Figura 21.19.

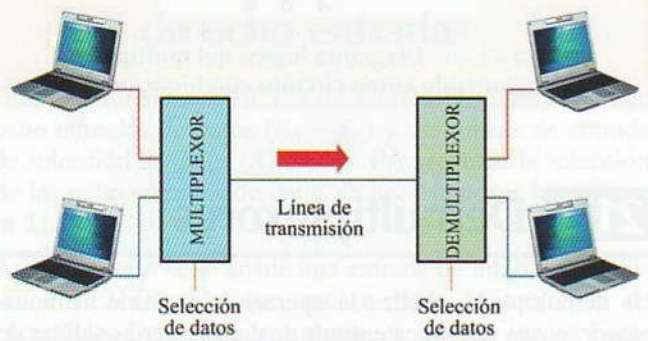


Figura 21.19. Sistema de transmisión de datos por una sola línea entre ordenadores mediante un multiplexor y un demultiplexor.

En la Figura 21.20 se muestra el esquema del demultiplexor 74HC138 de 8 salidas y 3 líneas de selección. Los datos de la única entrada E saldrán por las salidas negadas ($S_0 - S_7$) en función de la combinación de bits aplicados a la entrada de selección (A, B, C). Además, este CI dispone de dos líneas de habilitación o inhibición negadas (EN_1 y EN_2).

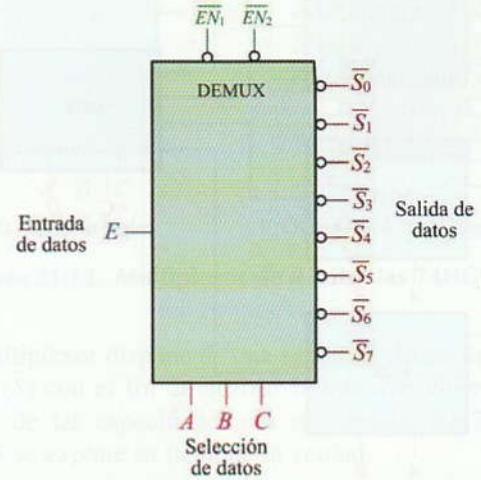


Figura 21.20. Demultiplexor de 8 salidas y 3 líneas de selección.

Actividad propuesta 21.1

El circuito integrado 74HC138 es un demultiplexor de 8 salidas y 3 líneas de selección, mientras que el 74HC154 dispone de 16 salidas y 4 de selección. Se trata de que consigas sus hojas de características, las estudies y con ellas realices su tabla de la verdad y un cuadro con sus diagramas de conexión y la disposición de pines de sus CI.

Estas hojas características las podrás encontrar con facilidad en Internet en las siguientes páginas web:

- http://www.datasheetlocator.com/es/
- http://www.datasheetcatalog.net/es/

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de estos circuitos integrados.*

21.4 Decodificadores

Los decodificadores son circuitos lógicos combinacionales que se construyen en un solo bloque con el fin de conseguir transformar una información codificada en sistema

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

binario, como por ejemplo el BCD, a otro tipo de código, como por ejemplo el decimal.

La función que tiene un codificador es traducir el lenguaje binario en el que trabajan los sistemas digitales (las máquinas) al lenguaje que entienden las personas (números decimales, letras, etc.).

Existen dos tipos de decodificadores, excitadores y no excitadores, en función de que sus salidas puedan, o no, poner en funcionamiento un indicador numérico, como por ejemplo un display de 7 segmentos.

En la Figura 21.21 se muestra el diagrama de bloques de un decodificador decimal, utilizado para la conversión de un código BCD a decimal. Al aplicar a las entradas ($E_0 \cdots E_3$) una combinación del código BCD natural, sólo una de las salidas S_0 a S_9 toma el valor lógico «1». A cada una de estas salidas se le asigna el valor decimal correspondiente.

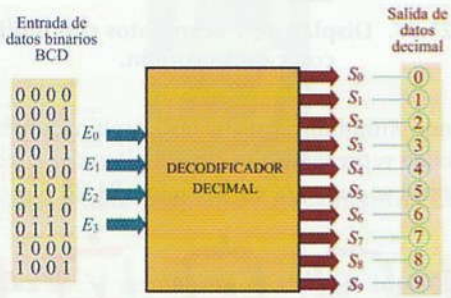


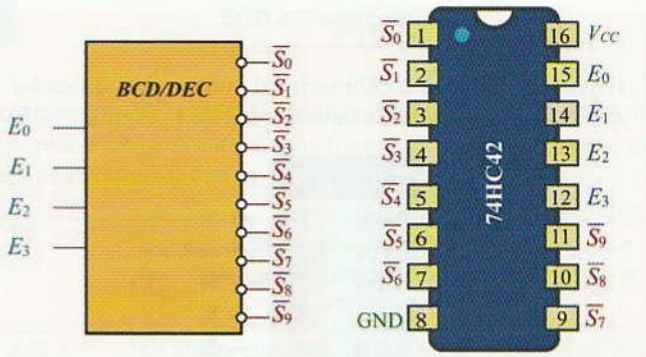
Figura 21.21. Decodificador BCD a decimal.

En la Figura 21.22 se muestra su tabla de la verdad. Observa que cuando la combinación binaria de la entrada no se corresponde a ninguna combinación del código BCD, todas las salidas se ponen a nivel bajo («0» lógico).

Nº	E_3	E_2	E_1	E_0	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 21.22. Tabla de la verdad de un codificador decimal de cuatro entradas binarias y 10 salidas con salida activa alta.

Es muy común encontrarse con decodificadores con salida activa baja, lo que indica que las salidas toman el valor lógico «0» en vez de «1» en la función de decodificación. En la Figura 21.23 se muestra un decodificador de salida activa baja, como el 74HC42 de cuatro entradas binarias y 10 salidas, y en la Figura 21.24 su tabla de la verdad.



(a) Símbolo lógico (b) Diagrama de conexión del CI

Figura 21.23. Decodificador 74HC42 de cuatro entradas binarias y 10 salidas con salida activa baja.

Nº	E_3	E_2	E_1	E_0	$\overline{S_0}$	$\overline{S_1}$	$\overline{S_2}$	$\overline{S_3}$	$\overline{S_4}$	$\overline{S_5}$	$\overline{S_6}$	$\overline{S_7}$	$\overline{S_8}$	$\overline{S_9}$
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
5	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
6	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 21.24. Tabla de la verdad del decodificador 74HC42 de salida activa baja.

21.4.1. Generación de funciones lógicas con un decodificador

Al igual que hacíamos con los demultiplexores, un decodificador también se puede utilizar para generar una determinada función lógica. Para ello, una vez conocida la función lógica a generar y su tabla de la verdad, se puede hacer funcionar el circuito lógico conectando una puerta OR a

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

las salidas de un decodificador que se correspondan con aquellas combinaciones de entrada que hacen «1» a la función, siempre y cuando se trate de un decodificador con salida activa alta. Para un decodificador de salida activa baja, el procedimiento sería el mismo pero conectando una puerta NAND.

Actividad resuelta 21.2

Diseña un circuito combinacional con un decodificador que cumpla con la tabla de la verdad de la Figura 21.25.

A B C	S	
0 0 0	0	S_0
0 0 1	1	S_1
0 1 0	1	S_2
0 1 1	1	S_3
1 0 0	0	S_4
1 0 1	0	S_5
1 1 0	0	S_6
1 1 1	1	S_7

Figura 21.25. **Tabla de la verdad del circuito combinacional.**

Para realizar el circuito lógico que cumpla con esta tabla de la verdad necesitaremos un decodificador que posea tantas entradas como variables. En nuestro caso tomaremos un decodificador de 3 entradas y 8 salidas, de salida activa alta, al que conectaremos una puerta OR a todas aquellas salidas que presenten un «1» lógico, tal como se muestra en la Figura 21.26(a). En la Figura 21.26(b) se presenta la solución con un decodificador de salida activa baja, al que se le ha conectado una puerta NAND a las salidas que cumplen la función.

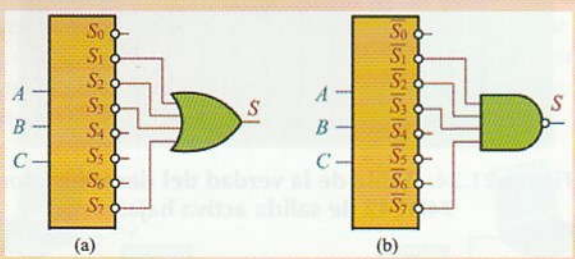


Figura 21.26. **(a) Solución con decodificador de salida activa alta. (b) Solución con decodificador de salida activa baja.**

21.4.2. Decodificador BCD a 7 segmentos

Este tipo de decodificadores pertenece al grupo de los excitadores, ya que es capaz de proporcionar a su salida los datos necesarios para poder conectar un display numérico de 7 segmentos. De esta forma podremos visualizar en forma decimal los datos decodificados.

El display o indicador numérico de 7 segmentos se puede fabricar a partir de la combinación de 7 diodos LED, tal como se muestra en la Figura 21.27.

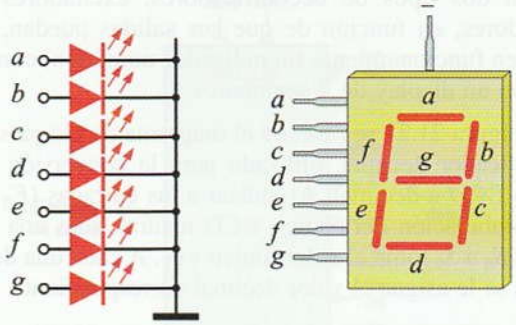


Figura 21.27. **Display de 7 segmentos con diodos LED con cátodo común.**

Alimentando simultáneamente las combinaciones de diodos se pueden representar los diez dígitos del sistema decimal, tal como se muestra en la Figura 21.28.

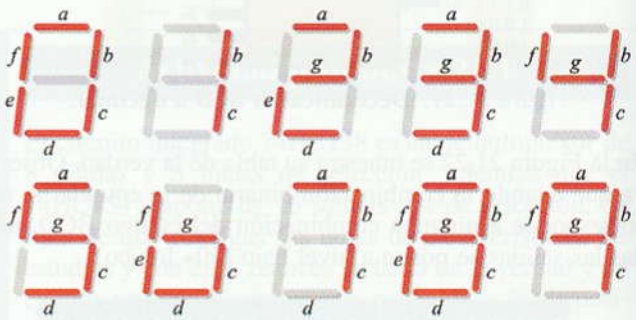


Figura 21.28. **Generación de números decimales con el display de 7 segmentos.**

Para la configuración en cátodo común se requiere de un decodificador que proporcione un nivel de salida alto («1» lógico) para la activación de los diodos LED. Ahora bien, en el caso de que el decodificador sea de nivel bajo de salida («0» lógico), para que los diodos se polaricen adecuadamente, será necesario utilizar un display en el que estén conectados en ánodo común, tal como se muestra en la Figura 21.29.

Aunque el uso del display con diodos LED se sigue utilizando, en la actualidad es muy común encontrarse con display que reemplazan los diodos por 7 segmentos de cristal líquido (LCD). Los LCD poseen un consumo de potencia mucho menor, pero en su contra tienen que no se pueden ver en la oscuridad, ya que funcionan polarizando la luz que incide en cada uno de los segmentos activados.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

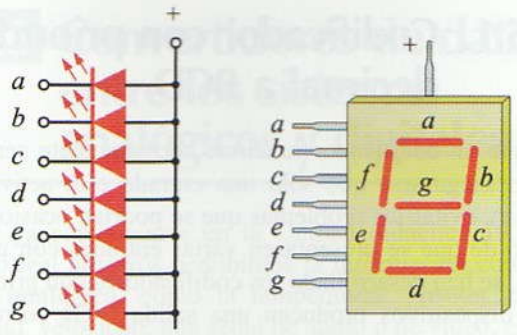


Figura 21.29. Display de 7 segmentos con diodos LED con ánodo común.

Figura 21.30. Display de 7 segmentos LCD.

En la Figura 21.31 se muestra el símbolo lógico de un decodificador BCD a 7 segmentos con cátodo común y otro con ánodo común.

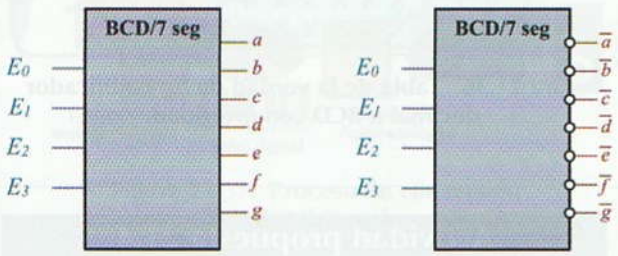


Figura 21.31. Símbolo lógico del decodificador BCD a 7 segmentos.

Actividad propuesta 21.2

Completa la tabla de la verdad de la Figura 21.32 correspondiente a un decodificador a 7 segmentos de ánodo común. Para ello, observa la Figura 21.29 donde podemos comprobar qué diodos LED se tienen que iluminar para formar los distintos números decimales cuando aparezca un «0» lógico en las salidas *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* y *g* del decodificador.

Nº	E_3	E_2	E_1	E_0	$\overline{a}$	$\overline{b}$	$\overline{c}$	$\overline{d}$	$\overline{e}$	$\overline{f}$	$\overline{g}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
⋮			⋮				⋮				

Figura 21.32. Tabla de la verdad de un decodificador BCD a 7 segmentos.

Un ejemplo de este tipo de decodificadores es el 74LS47 (Figura 21.33). A este dispositivo se le añaden una serie de líneas de control con la siguiente función:

$\overline{LT}$	Entrada de comprobación. Al activarse con nivel bajo («0» lógico) se activan todas las salidas y se iluminan los 7 segmentos del display.
$\overline{RBI}$	Se utiliza con el fin de que no se visualice en el display el cero en ciertas circunstancias. Al activarse con nivel bajo, se visualiza el código de entrada, siempre y cuando éste sea diferente a cero. Cuando el código de entrada sea cero, se desactivan todas las salidas, apagándose todos los segmentos a la vez.
$\overline{RBI}/\overline{RBO}$	Puede funcionar como entrada o como salida. En el funcionamiento como entrada, cuando se activa a nivel bajo se produce la desactivación de todos los segmentos del display. Cuando funciona como salida, nos informa cuando el código de entrada es cero cuando el terminal esté activado.

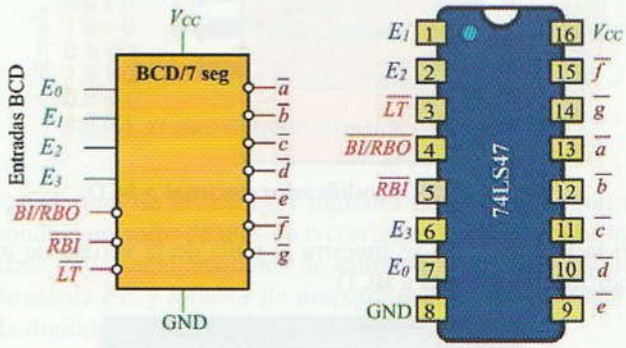


Figura 21.33. Decodificador BCD a 7 segmentos 74LS47.

Actividad propuesta 21.3

Consulta las hojas características del circuito integrado 74LS47, analiza sus características más relevantes, y realiza su tabla de la verdad.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Estas hojas características las podrás encontrar con facilidad en Internet en las siguientes páginas web:

- http://www.datasheetlocator.com/es/
- http://www.datasheetcatalog.net/es/

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de este circuito integrado.*

21.5 Codificadores

Los codificadores realizan la función contraria que los decodificadores, codifican en forma binaria la información numérica o alfanumérica que se le aplica a su entrada.

Un codificador es un circuito combinacional con una serie de entradas por donde conectaremos la información numérica a codificar. Cuando una de ellas adopta el estado lógico «1», en las líneas de salida se genera el código de varios bits que corresponda con la información a codificar. En la Figura 21.34 se muestra el diagrama de bloques de un codificador decimal a BCD.

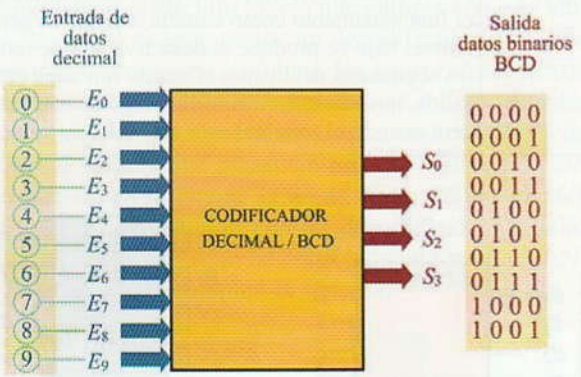


Figura 21.34. Codificador decimal a BCD.

En la Figura 21.35 se muestra la tabla de la verdad de un codificador decimal a BCD.

Nº	E_9	E_8	E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2	E_1	E_0	S_3	S_2	S_1	S_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Figura 21.35. Tabla de la verdad de un codificador decimal a BCD.

21.5.1. Codificador con prioridad decimal a BCD

Para que un codificador funcione correctamente sería necesario asegurarse que sólo una entrada está activa a la vez. Para evitar los problemas que se podrían ocasionar en el caso de que se presentasen varias entradas con un «1» lógico, se han desarrollado los codificadores con prioridad. Estos dispositivos producen una salida BCD correspondiente al dígito decimal de entrada de más alto orden que se encuentre activo. Así, por ejemplo, si se encuentran activas las entradas 4 y 7, el codificador proporcionará a la salida el código BCD 0111, que se corresponde con el dígito de más peso, que en este caso es el 7.

En la Figura 21.36 se muestra la tabla de la verdad de un codificador decimal a BCD con prioridad.

Nº	E_9	E_8	E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2	E_1	E_0	S_3	S_2	S_1	S_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	X	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1	X	X	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	1	X	X	X	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	1	X	X	X	X	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	X	X	X	X	X	0	1	0	1
6	0	0	0	1	X	X	X	X	X	X	0	1	1	0
7	0	0	1	X	X	X	X	X	X	X	0	1	1	1
8	0	1	X	X	X	X	X	X	X	X	1	0	0	0
9	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	0	0	1

Figura 21.36. Tabla de la verdad de un codificador decimal a BCD con prioridad.

Actividad propuesta 21.4

El 74HC147 es un codificador con prioridad con entradas a nivel bajo para los números decimales del 0 al 9, y salidas BCD activas a nivel bajo. Consulta las hojas características de este circuito integrado, analiza sus características más relevantes, obtén su símbolo lógico y el diagrama de terminales del CI, y realiza también su tabla de la verdad.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de este circuito integrado.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.6 Convertidores de datos entre los sistemas analógicos y digitales

Como ya comentamos en la Unidad didáctica 19, en el mundo real nosotros percibimos la información como una **señal analógica**, como la temperatura, presión, caudal, longitud, velocidad, una señal de audio o de vídeo, el valor de la tensión, etc. Las señales analógicas son muy difíciles de manipular, guardar y después recuperar con **exactitud**. Si estas señales analógicas se convierten en **señales digitales**, su tratamiento se hace mucho más fácil, sobre todo con los sistemas programables como los microprocesadores y los ordenadores.

Para realizar esta conversión se utiliza un dispositivo denominado conversor analógico-digital **A/D** o **ADC** (*Analogic to Digital Converter*), al que se le alimenta con la señales eléctricas en forma analógica (como la que proporciona un micrófono) y a continuación las convierte en señales digitales, es decir, en «unos» y «ceros» (1-0). (Véase la Figura 21.37.)

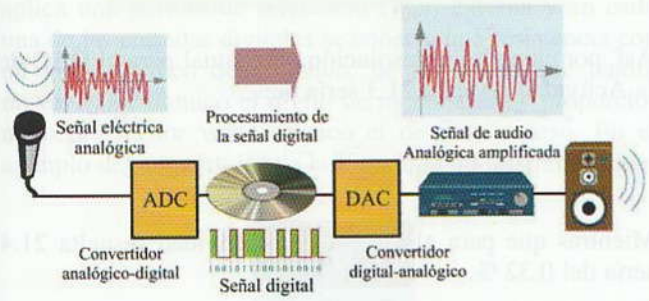


Figura 21.37. Proceso de conversión analógico-digital (ADC) y viceversa (DAC).

Una vez procesada la información en formato digital, para poder ser reconocida por nosotros es necesario realizar el proceso inverso, es decir, convertir las señales digitales en señales analógicas con sus correspondientes variaciones de tensiones.

Así, por ejemplo, si aplicásemos una señal de audio digital a un altavoz, lo único que escucharíamos sería algo parecido a lo que se oye por un fax, una serie de pitidos con interrupciones correspondientes a la señal digital. De esta forma, un altavoz sólo reconoce señales analógicas, al igual que una pantalla de un ordenador o de un televisor.

Esa nueva conversión de digital a analógico se realiza mediante un conversor digital-analógico **D/A** o **DAC** (*Digital-to-Analog Converter*).

Ejemplos de convertidores:

- Una tarjeta de sonido de un ordenador. Por la entrada de micrófono debe poseer un convertidor A/D y por sus salida de altavoces un convertidor D/A.
- Un polímetro necesita un convertidor A/D que muestre las magnitudes eléctricas en forma de dígitos en el display.
- Un termómetro digital necesita un convertidor A/D que muestre el valor de la temperatura en forma numérica en un display digital.

La conversión digital analógica suele ser más fácil de entender y un convertidor D/A suele formar parte de un convertidor A/D, por lo que estudiaremos primero el D/A.

21.6.1. Conversor digital-analógico D/A (DAC)

El sistema de conversión D/A consiste en tomar el valor representado en código digital de n bits y convertirlo en una tensión o corriente que sea proporcional al valor digital.

Figura 21.38. Convertidor D/A de cuatro bits.

A cada uno de los códigos digitales de entrada le corresponderá un valor de tensión o corriente único. Al valor máximo de la señal analógica de salida se le denomina fondo de escala ***FE*** y ***k*** factor de proporcionalidad entre la entrada digital y la salida analógica.

$$\text{Salida analógica} = k \times \text{Entrada digital}$$

Actividad resuelta 21.3

Un convertidor D/A de tres bits produce una tensión de salida de 14 V para la entrada digital 111. Escribe una tabla con la correspondencia de conversión de todas las entradas digitales y calcula el factor de proporcionalidad.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución: Para que la relación de conversión sea equivalente el valor digital 000 se corresponderá con 0 voltios y el 111 con el fondo de escala de 14 V, tal como se muestra en la tabla de la Figura 21.39.

Entrada digital $E_1\ E_2\ E_0$	Salida analógica Tensión
0 0 0	0 V
0 0 1	2 V
0 1 0	4 V
0 1 1	6 V
1 0 0	8 V
1 0 1	10 V
1 1 0	12 V
1 1 1	14 V

Figura 21.39.

Dado que el número binario 111 se corresponde con el 7 en código decimal, el factor de proporcionalidad lo calcularemos así:

$$k = \frac{\text{Salida analógica}}{\text{Entrada digital}} = \frac{14\ \text{V}}{7} = 2\ \text{V}$$

Actividad resuelta 21.4

Un convertidor D/A de 5 bits produce una tensión de salida de 2,5 V para la entrada digital 11001. Calcula el factor de proporcionalidad entre la entrada digital y la salida analógica ¿Qué tensión de salida le corresponderá a la entrada digital correspondiente al fondo de escala?

Solución:

$$11001_2 = 1\cdot 2^4 + 1\cdot 2^3 + 0\cdot 2^2 + 0\cdot 2^1 + 1\cdot 2^0 = 25_{10}$$

$$k = \frac{\text{Salida analógica}}{\text{Entrada digital}} = \frac{2{,}5\ \text{V}}{25} = 0{,}1\ \text{V}$$

$$\text{Fondo de escala} = 11111_2 = \cdots = 31_{10}$$

$$\text{Salida analógica } FE = k \times \text{Entrada digital} =$$

$$= 0{,}1\cdot 31 = 3{,}1\ \text{V}$$

21.6.1.1. Resolución de un convertidor D/A

Se define como la mínima variación que puede ocurrir en la salida analógica como resultado de un cambio en la entrada digital.

Así, por ejemplo, en la Actividad resuelta 21.3, el salto de tensión que hay entre dos códigos de entrada consecutivos es de 2 V. Para calcularla se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\text{Resolución} = \frac{FE}{2^n - 1}$$

En nuestro ejemplo de la Actividad resuelta 21.3:

$$\text{Resolución} = \frac{14}{2^3 - 1} = 2\ \text{V}$$

Actividad propuesta 21.5

Calcula la resolución del convertidor de la Actividad resuelta 21.4.

Solución: 0,1 V

La resolución se suele expresar en porcentaje en relación con el fondo de escala:

$$\text{Resolución (\%)} = \frac{\text{Resolución}}{FE} = 100$$

Así, por ejemplo, la resolución porcentual para el DAC de la Actividad resuelta 21.3 sería de:

$$\text{Resolución (\%)} = \frac{2}{14}\,100 = 14{,}29\%$$

Mientras que para el DAC de la Actividad resuelta 21.4 sería del 0,32 %.

La resolución porcentual de un DAC depende únicamente del número de bits. Por esta razón, los fabricantes suelen indicar la resolución de un DAC como el número de bits. Un DAC de 5 bits tiene una resolución mayor (más sensible) que uno de 3 bits.

A modo de ejemplo, en la Tabla 21.1 se muestra la resolución en voltios que tendría un DAC en función de su número de bits si su fondo de escala fuese 15 V.

Tabla 2.10. **Resolución de un DAC en función de su número de bits para un fondo de escala de 15 V.**

n bits del DAC	Resolución
4 bits	$15\ \text{V}/2^4 - 1 = 1\ \text{V}$
8 bits	$15\ \text{V}/2^8 - 1 = 58{,}8\ \text{mV}$
16 bits	$15\ \text{V}/2^{16} - 1 = 0{,}23\ \text{mV}$
32 bits	$15\ \text{V}/2^{32} - 1 = 0{,}0035\ \mu\text{V}$

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.6.1.2. Convertidor D/A de resistencias ponderadas

Existen varios tipos de convertidores D/A, pero todos se basan en realizar la suma de tensiones que proporciona cada bit del código de entrada digital en función de su peso.

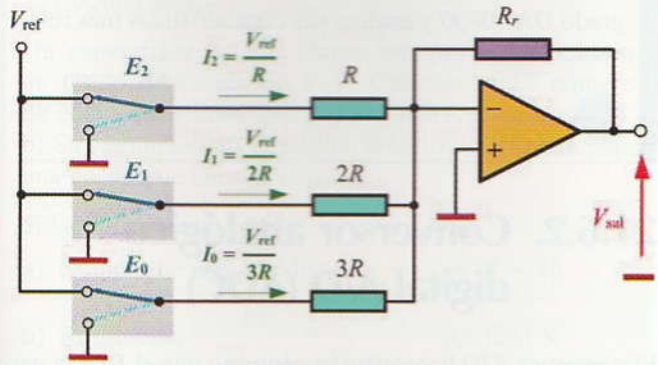


Figura 21.40. Convertidor D/A de resistencias ponderadas de tres bits.

En la Figura 21.40 se muestra un convertidor de resistencias ponderadas de tres bits de entrada. Al circuito se le aplica una tensión de referencia (V_{ref}) externa y en cada una de las entradas digitales se conecta una resistencia con un valor óhmico determinado, de tal forma que tendrá mayor valor óhmico el dígito de menor peso y proporcionalmente menor valor óhmico el de mayor peso. En el ejemplo del convertidor de la Figura 21.40 tendremos que:

Entrada digital		
E_1	E_2	E_0
2^2	2^1	2^0
R	$2R$	$3R$

Figura 21.41.

De tal forma que si un bit toma un valor cero, su interruptor asociado se mantiene abierto y no proporciona corriente al amplificador operacional. Si el bit toma un valor 1 su interruptor se cierra y circula una cierta corriente por su resistencia. La corriente será mayor cuanto menor sea esta resistencia. Observa cómo la corriente es mayor para la posición digital de mayor peso (para la posición 2^2 la corriente fluye por R) que para el de menor peso (para la posición 2^0 la corriente fluye por $3R$ y es menor).

La intensidad que llega al amplificador operacional será el resultado de sumar la de cada una de estas tres posiciones, dando a la salida una tensión proporcional a la señal digital de la entrada.

21.6.1.3. Convertidor D/A de resistencias *R*-2*R* en escalera

En la práctica se hace un poco difícil la construcción de este tipo de convertidores, ya que para que funcionen con una cierta precisión es necesario el empleo de resistencias de muy distintos valores que posean una tolerancia muy pequeña. Para evitar este problema se utilizan redes de resistencias *R*-2*R* en escalera, como en el circuito de la Figura 21.42, que consiguen que las corrientes que circulan por cada una de las resistencias tengan una progresión de 1/2. De esta forma es posible construir convertidores D/A de muchos bits con el empleo de sólo dos resistencias de valores R y $2R$, que por supuesto sean de gran precisión o baja tolerancia.

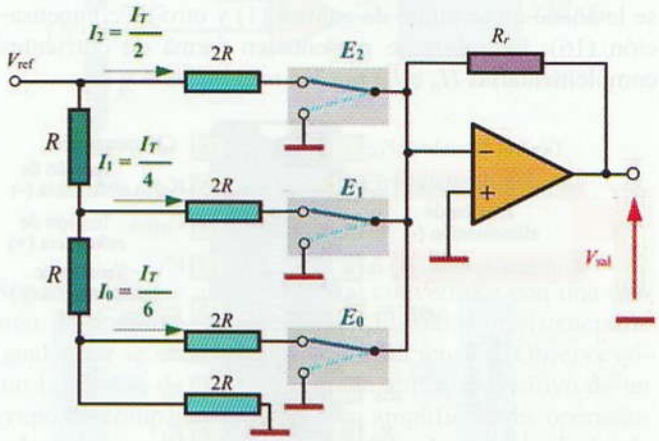


Figura 21.42. Convertidor D/A de resistencias *R*-2*R* en escalera de tres bits.

21.6.1.4. Convertidores D/A comerciales

En la práctica uno de los convertidores más utilizados es el *R*-2*R* en escalera, siempre y cuando no se necesite una precisión muy elevada. También existen otros tipos de convertidores, como por ejemplo los de conversión directa o secuencial, corrientes segmentadas, sigma-delta, etc. A la hora de seleccionar el convertidor más adecuado para una determinada aplicación no es importante saber su funcionamiento interno, pero sí conocer sus características más relevantes, como son:

- La resolución, que depende del número de bits de entrada del convertidor.
- El tipo de código digital de entrada, como por ejemplo el código binario natural o el decimal codificado en binario (BCD).
- Frecuencia de conversión, así como el tiempo de conversión, que se define por el tiempo que necesita para efec-

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

tuar el máximo cambio de su tensión con un error mínimo en su resolución.

- Tensión de referencia, que puede ser interna o externa, si es externa puede ser variada entre ciertos márgenes. La tensión de salida dependerá de dicha tensión de referencia.
- Tensión de alimentación.

Un ejemplo comercial de un conversor D/A es el DAC0800 (véase la Figura 21.43). Este convertidor es del tipo *R*-2*R* de 8 bits. El circuito necesita para su funcionamiento de una tensión de alimentación simétrica V^+ y V^- de ± 15 V (terminales 3 y 13). Las entradas digitales se encuentran entre los terminales 5 a 12, comenzando por el más significativo (MSB) y acabando por el menos significativo (LSB). La tensión de referencia puede ser positiva o negativa y se alimenta por los terminales 14 y 15. Además se le añade un terminal de control (1) y otro de compensación (16). La salida se presenta en forma de corrientes complementarias (I_0 e $\overline{I}_0$) por los terminales 4 y 2.

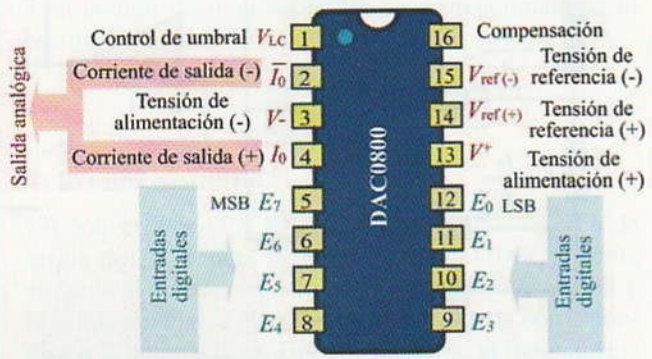


Figura 21.43. Conexiones del convertidor D/A DAC0800.

En la Figura 21.44 se muestra un ejemplo de conexión del DAC0800, al que se le ha alimentado con una tensión de referencia de 10 V. En los terminales de salida 4 y 2 se le ha conectado una resistencia con el fin de convertir las corrientes de salida en tensión de salida.

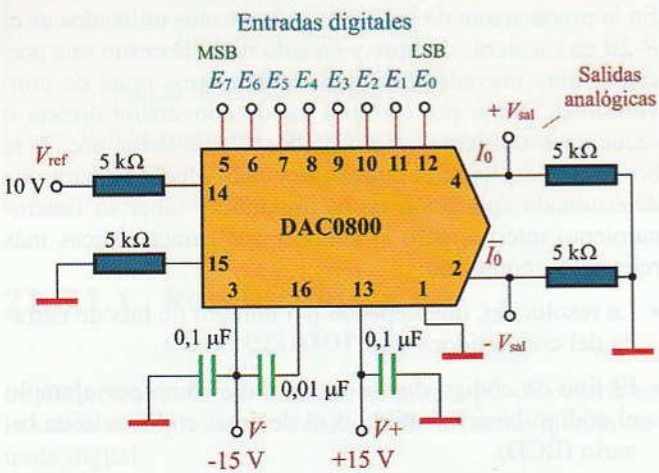


Figura 21.44. Circuito de un convertidor D/A con un DAC0800.

Actividad propuesta 21.6

Consulta las hojas de características del circuito integrado DAC0800 y analiza sus características más relevantes.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de este circuito integrado.*

21.6.2. Conversor analógico digital A/D (ADC)

El conversor A/D hace justo lo contrario que el D/A, a partir de una señal de entrada analógica consigue una señal digital con un número determinado de bits (véase la Figura 21.45).

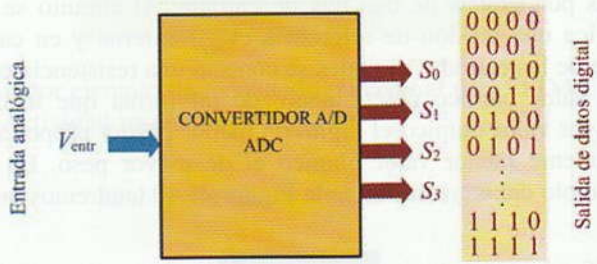


Figura 21.45. Convertidor A/D de cuatro bits.

Al igual que ocurría con el convertidor D/A, a cada valor de la tensión de entrada le corresponderá un código digital único con un determinado factor de proporcionalidad. En la Figura 21.46 se muestra la característica de transferencia

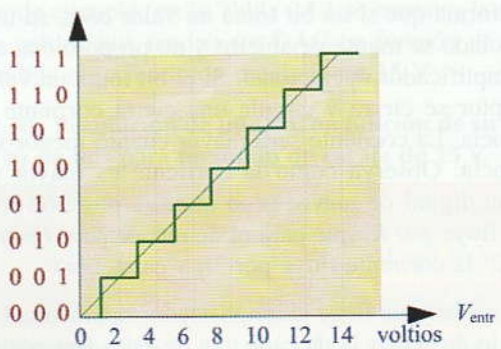


Figura 21.46. Característica de transferencia de un convertidor D/A ideal de tres bits.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

de un convertidor D/A ideal de tres bits para un fondo de escala de salida de 14 V. Observa cómo para cada uno de los números binarios de entrada le corresponde una determinada tensión de salida. A todo esto, hay que decir que, la señal analógica nunca podrá ser exactamente representada, siempre habrá algo de error.

Actividad resuelta 21.5

Un convertidor A/D de cuatro bits posee una tensión de fondo de escala de 8 V. Calcula: a) El número de códigos distintos que pueden aparecer en la salida. b) Su resolución. c) El código binario en la salida para una tensión de entrada de 6 V.

Solución:

a) Número de códigos distintos $= 2^n = 2^4 = 16$

b) Resolución $= \dfrac{FE}{2^n - 1} = \dfrac{8\text{ V}}{2^4 - 1} = 0{,}53333\text{ V}$

c) Código de salida en decimal $= \dfrac{6}{0{,}53333} = 11{,}25$

Que redondeado le corresponde el 11.

Código de salida binario $= 11_{10} = 1011_2$

21.6.2.1. Tipos de convertidores A/D

Para la construcción de convertidores A/D se utilizan dos técnicas básicas, con realimentación o sin ella. Seguidamente se hace referencia a los convertidores A/D más comunes.

- **Flash:** Posee una elevada velocidad de funcionamiento. Se construye mediante un conjunto de divisores de tensión y comparadores, realizando la conversión de manera rápida en una única operación. Su desventaja es el elevado coste.
- **De aproximaciones sucesivas**: Es uno de los más empleados, sobre todo para aplicaciones que no necesitan grandes velocidades ni resoluciones. Dado su bajo precio se suele integrar en los microcontroladores, consiguiendo una solución económica en un único chip en gran cantidad de aplicaciones de control. Su principal desventaja es el elevado tiempo de conversión.
- Otros tipos de conversores igualmente utilizados son: sigma-delta, rampa, doble-rampa, etc.

Convertidor A/D flash o paralelo

El más simple de los convertidores D/A sin realimentación es el flash o paralelo.

A modo de ejemplo, en la Figura 21.47 se muestra el circuito básico de un convertidor A/D flash o paralelo de tres bits.

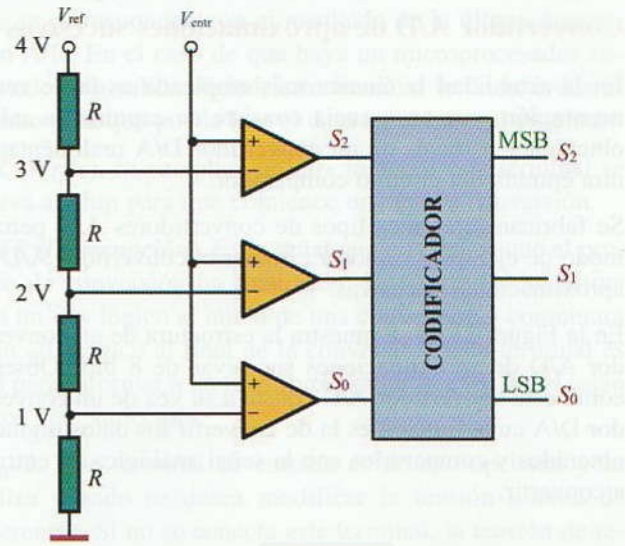


Figura 21.47. Convertidor A/D flash o paralelo de tres bits.

Supongamos que alimentamos al convertidor con una tensión de referencia (V_{ref}) de 4 V. La red de resistencia de igual valor se encarga de dividir esta tensión. Observa cómo la tensión de entrada (V_{ent}) se aplica al positivo de un grupo de comparadores (que son amplificadores operacionales), mientras que al negativo de cada comparador se le aplica cada una de las tensiones de referencia producidas por el divisor de tensión resistivo.

El funcionamiento del comparador es muy simple, cuando la tensión de entrada no inversora (+) es mayor que la tensión de referencia en la entrada inversora (−), la salida del comparador proporciona un «1» lógico. En caso contrario se produce un «0» lógico (véase la Figura 21.48).

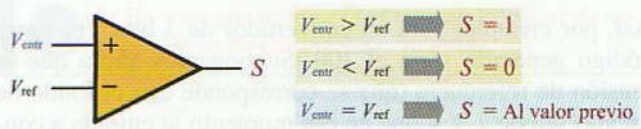


Figura 21.48. Funcionamiento del comparador.

De esta forma si aplicamos una tensión de entrada de 4 V, a la salida de los comparadores tendremos el código binario 111; y para 2 V el código 011.

Las salidas de los comparadores se conectan a un circuito codificador, que convierte la señal generada por los mismos en un código binario.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la práctica, este tipo de comparadores no es muy utilizado, ya que se necesitan un gran número de comparadores que consumen una gran cantidad de energía.

Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas

En la actualidad la técnica más empleada es la de **realimentación**, que en esencia consiste en capturar la salida obtenida y a través de un convertidor D/A realimentar la otra entrada del circuito comparador.

Se fabrican diferentes tipos de convertidores A/D pero, a modo de ejemplo, vamos a estudiar el convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.

En la Figura 21.49 se muestra la estructura de un convertidor A/D de aproximaciones sucesivas de 8 bits. Observa cómo este convertidor A/D consta a su vez de un convertidor D/A cuya función es la de convertir los datos digitales obtenidos y compararlos con la señal analógica de entrada a convertir.

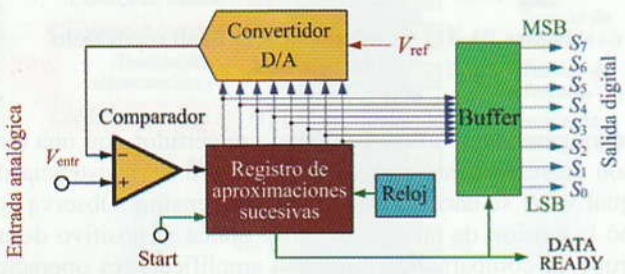


Figura 21.49. Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas de 8 bits.

El proceso de conversión comienza con un pulso en el terminal de Star, esto también hace que se deshabilite el buffer de salida. En ese momento el registro de aproximaciones sucesivas, impulsado por los ciclos del reloj, genera de forma automática un código binario que se encuentre a la mitad de la escala en función del número de bits.

Así, por ejemplo, para un convertidor de 3 bits, el primer código generado sería el 100. Supongamos ahora que la tensión de referencia (que se corresponde con el fondo de escala) sea de 7 V y que en ese momento la entrada a convertir es de 2 V. Con estos parámetros las correspondencias entre las entradas y las salidas deberían ser las de la Figura 21.50.

Como el primer código digital generado es el 100, el convertidor D/A genera una tensión en su salida de 4 V. El operacional compara estos 4 V con los 2 V de la entrada. Dado que la salida del convertidor D/A es mayor que la de entrada, el comparador genera una señal de salida que hace que el registro de aproximaciones, impulsado por los ciclos del reloj, pruebe con diferentes códigos binarios. Al final del proceso el convertidor consigue averiguar mediante sucesivas comparaciones qué código digital le corresponde exactamente a la señal de entrada de 2 V. Una vez acabado el proceso, se activa la salida Data Ready, y la salida digital queda disponible en el buffer de salida.

MSB LSB	Tensión generada por el DAC
0 0 0	0 V
0 0 1	1 V
0 1 0	2 V
0 1 1	3 V
1 0 0	4 V
1 0 1	5 V
1 1 0	6 V
1 1 1	7 V

Figura 21.50.

21.6.2.2. Convertidores A/D comerciales

Uno de los conversores más utilizados por su buena relación velocidad/precio es el de la serie ADC080X (ADC0801, ADC802, ADC0803 y ADC0804). Este conversor integrado es del tipo de aproximaciones sucesivas y dispone de una salida de 8 bits, siendo capaces de convertir una tensión de entrada analógica entre 0 V y 5 V. Por tanto, su resolución será de:

$$\text{Resolución} = 5/2^8 - 1 = 0{,}0196 \text{ V} = 19{,}6 \text{ mV}$$

La velocidad de conversión es de 100 µs (es decir, se pueden hacer 10.000 conversiones por segundo) y dispone de la posibilidad de utilizar un reloj interno o la conexión de uno externo.

En la Figura 21.51 se muestra el diagrama de conexiones del CI y la denominación de sus terminales.

Por los terminales 6 y 7 se introduce la señal analógica a convertir V_{IN^+} y V_{IN^-}. Estas entradas son diferenciales, por lo que la señal de entrada a convertir es la diferencia entre las tensiones aplicadas a estos terminales. Para conversiones de una sola entrada, lo normal es conectarla al terminal V_{IN^+}, mientras que el V_{IN^-} se conecta a masa. Estas tensiones no deberán superar en ningún caso a la de alimentación.

Este CI posee un circuito interno que genera los pulsos de reloj. A través del terminal 19 (CLK R) se le puede controlar la frecuencia de reloj. Para ello se conecta un circuito

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

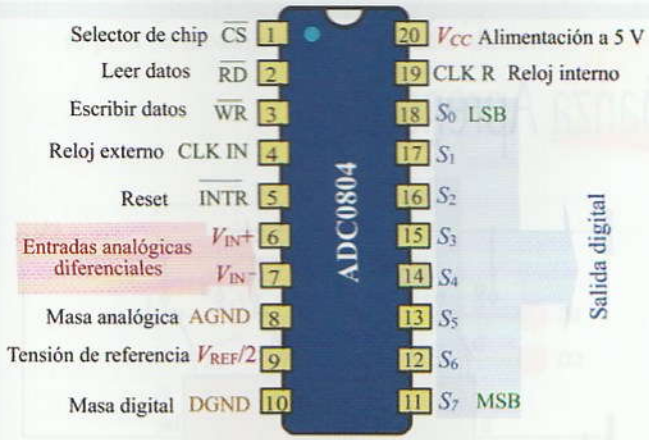


Figura 21.51. Diagrama de conexiones del DAC0804.

RC entre los terminales 19 y 4, siendo la frecuencia resultado de la siguiente expresión: $1/(1{,}1 \cdot R \cdot C)$. Así, por ejemplo, para un frecuencia habitual de funcionamiento de 606 kHz, se utiliza $R = 10$ kΩ y $C = 150$ pF. Para esta frecuencia de reloj se consigue que el tiempo de conversión sean unos 100 µs. En el caso de que se necesite aplicar una señal externa de reloj, se conecta directamente al terminal 4 (CLK IN).

El circuito posee conexiones a masa diferentes para las señales analógicas (AGND) y para las digitales (DGND). Aunque no es estrictamente necesario el uso separado de estas masas, sí que es conveniente, ya que la masa digital suele contener mucho ruido debido a los cambios rápidos de corriente de los circuitos de conmutación digital.

Este convertidor está preparado para poder ser interconectado con un bus de datos de un microprocesador o de un microcontrolador, es por eso que los nombres de algunos de los terminales se asemejan a los de estos sistemas, como por ejemplo:

$\overline{CS}$ (***chip-select***)**.** Es el que habilita al chip para que pueda funcionar. Como es negado, si este terminal se activa con un «1» lógico (5 V), el chip se deshabilita. Si queremos que el chip esté siempre habilitado, bastará con conectar este terminal a masa.

$\overline{RD}$ (***Read***)**.** Este terminal se utiliza para habilitar el buffer de salida digital y así dar lectura a los datos convertidos. Cuando este terminal está a un «0» lógico, los terminales de salida digital del 11 al 18 alcanzarán los niveles lógicos que se corresponden con el resultado de la última conversión A/D. En el caso de que haya un microprocesador conectado a la salida digital, este terminal le da la orden al mismo para que pueda leer el dato en el bus del sistema.

$\overline{WR}$ (***Write***)**.** Si se aplica un «0» lógico a este terminal se activa al chip para que comience una nueva conversión.

$\overline{INTR}$ (***Interrupción***)**.** Es la señal que nos indica que el proceso de conversión ha finalizado. Este terminal se activa con un «1» lógico al inicio de una conversión y conmutará a un «0» lógico al final de la conversión. Este terminal es útil para informar a un microprocesador que los datos están listos para su lectura.

$V_{ref}/2$**.** Este terminal de entrada es de uso opcional y se utiliza cuando se desea modificar la tensión interna de referencia. Si no se conecta este terminal, la tensión de referencia que se obtiene es $V_{CC}/2$ (es decir 2,5 V). Si aplicásemos una tensión externa a este terminal se podría modificar el fondo de escala del convertidor y así poder ser utilizado para diferentes tensiones de entrada.

Para conseguir una conversión de forma continua $\overline{CS}$ y $\overline{RD}$ deben estar a «0» (masa) y el terminal conectado a la entrada de $\overline{WR}$.

En la Figura 21.61 correspondiente a la Actividad práctica 21.7 se muestra un ejemplo de conexión del ADC0804.

Actividad propuesta 21.7

Consulta las hojas de características del circuito integrado ADC0804 y analiza sus características más relevantes.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de este circuito integrado.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

21.1 Comprobación del funcionamiento de un decodificador BCD a decimal. Para la realización de esta actividad utilizaremos el decodificador integrado 74HCT42 (Figura 21.52) y 10 diodos LED que conectaremos a las salidas. En la Figura 21.53 se muestra el esquema del circuito para su montaje en el entrenador didáctico.

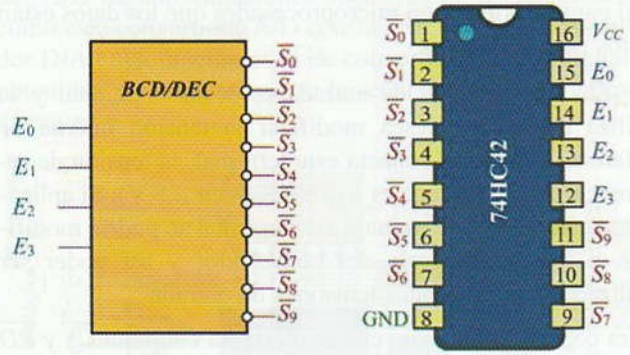


Figura 21.52. Decodificador 74HC42 de cuatro entradas binarias y 10 salidas con salida activa baja.

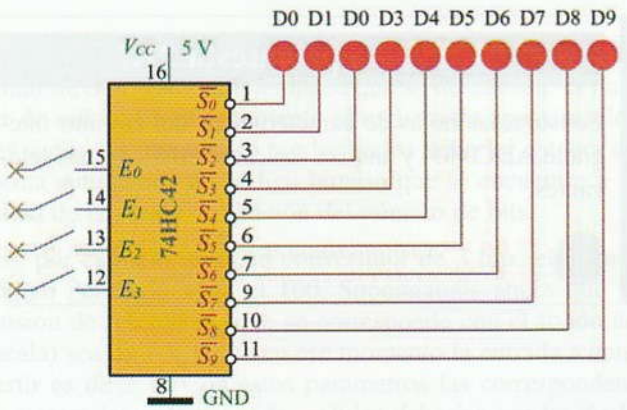


Figura 21.53. Esquema del decodificador BCD a decimal para montaje en entrenador didáctico.

En el caso de realizar el montaje sobre una placa protoboard necesitaremos además cuatro conmutadores para la entrada de datos y 10 resistencias de 330 Ω para la conexión de los diodos LED, tal como se muestra en el esquema de la Figura 21.54.

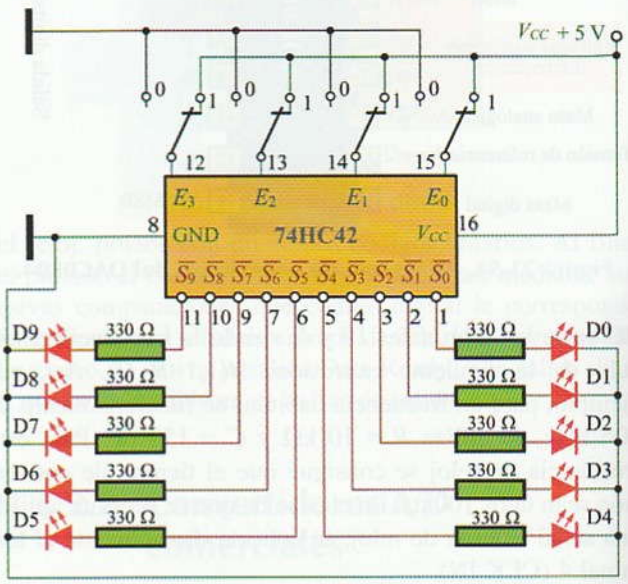


Figura 21.54. Esquema del decodificador BCD a decimal para montaje en placa protoboard.

Una vez montado el circuito consigue las diferentes combinaciones del código BCD abriendo y cerrando los conmutadores de entrada y comprueba las salidas activas en función del número de diodo que se enciende. Con los datos obtenidos completa la tabla de la verdad de la figura.

21.2 Comprobación de un multiplexor de 8 entradas. Para la realización de esta actividad práctica utilizaremos el multiplexor integrado 74HC151 (Figura 21.55).

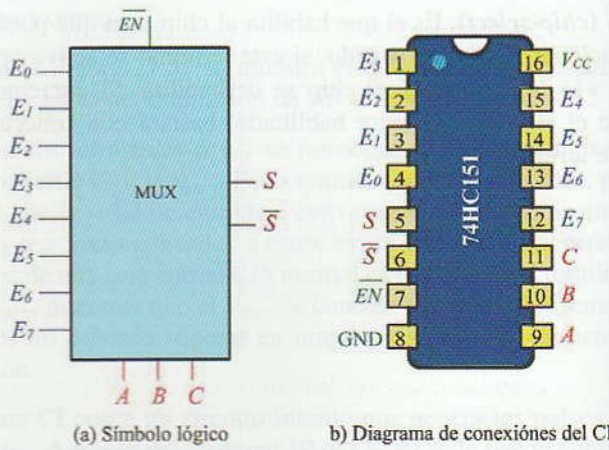


Figura 21.55. Multiplexor de 8 entradas 74HC151.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

En la Figura 21.56 se muestra el esquema del circuito para su montaje en el entrenador didáctico.

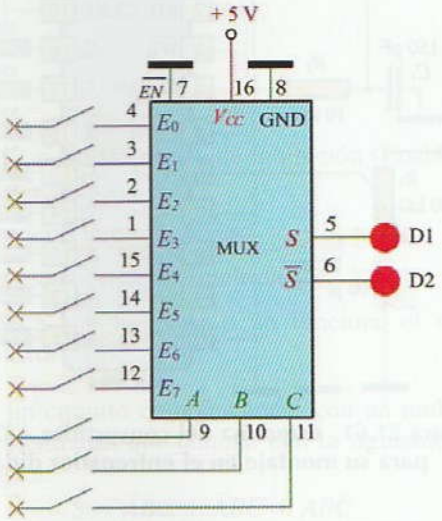


Figura 21.56. Esquema del multiplexor para su montaje en el entrenador didáctico.

Una vez montado, comprueba cómo se traslada la información presente en las entradas hacia la salida, en función del número binario que activemos en las 3 líneas de selección de datos. Con los datos obtenidos completa la tabla de la verdad de la Figura 21.57.

$\overline{EN}$	A	B	C	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	S	$\overline{S}$
0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	0	1
⋮	⋮					⋮						⋮	

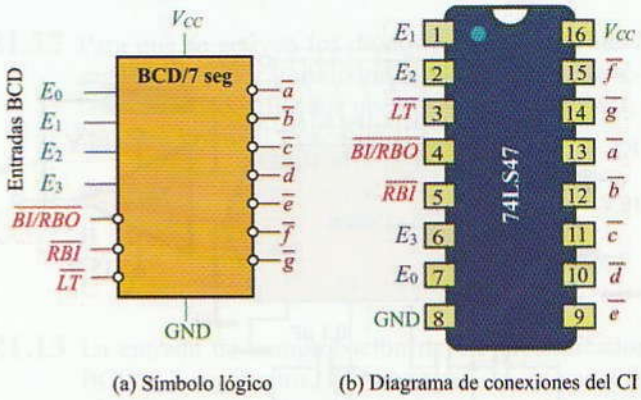
Figura 21.57. Tabla de la verdad.

21.3 Diseño de una alarma con un multiplexor. En la Actividad resuelta 21.1 hemos diseñado un circuito combinacional con un multiplexor de 8 entradas para poner en funcionamiento una alarma de tres entradas. Se trata de que compruebes de forma práctica el funcionamiento del circuito. Para ello puedes utilizar el multiplexor 74HC151.

Con la ayuda de la Figura 21.16 y el profesor, dibuja el esquema de conexiones para llevar a cabo esta actividad práctica en el entrenador didáctico y, una vez comprobado su funcionamiento, escribe la tabla de la verdad.

21.4 Comprobación del funcionamiento de un demultiplexor. Consigue las hojas de características del multiplexor integrado 74HC138 (las puedes encontrar en www.paraninfo.es) y con ayuda del profesor comprueba de forma práctica el funcionamiento de este demultiplexor.

21.5 Decodificador BCD a 7 segmentos. Para la realización de esta actividad utilizaremos el decodificador integrado 74LS47 (Figura 21.58).



(a) Símbolo lógico (b) Diagrama de conexiones del CI

Figura 21.58. Decodificador BCD a 7 segmentos 74LS47.

Dado que este decodificador pone sus salidas activas a nivel bajo («0» lógico), necesitaremos un display de siete segmentos con los diodos conectados en ánodo común. Para la alimentación correcta de los 7 diodos LED de cada segmento, necesitaremos conectar a cada uno de ellos una resistencia de 330 Ω, por lo que necesitaremos un módulo de 7 × 330 Ω. En la Figura 21.59 se muestra el esquema del circuito para su montaje en el entrenador didáctico.

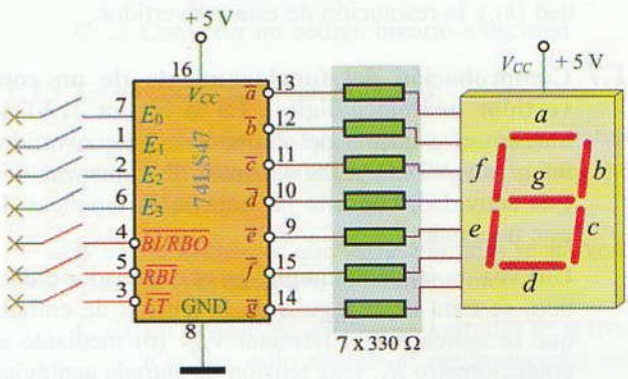


Figura 21.59. Esquema del decodificador BCD a 7 segmentos.

Una vez montado el circuito consigue las diferentes combinaciones del código BCD abriendo y cerrando los conmutadores de entrada y comprueba que el código binario introducido se corresponde con el número decimal visualizado en el display.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.6 Comprobación del funcionamiento de un convertidor digital/analógico. Para la realización de esta actividad utilizaremos el convertidor D/A integrado DAC0800. En la Figura 21.60 se muestra el esquema del circuito para su montaje en el entrenador didáctico. El amplificador operacional LM741C se ha conectado a los terminales de corriente de salida con el fin de obtener en la misma una tensión.

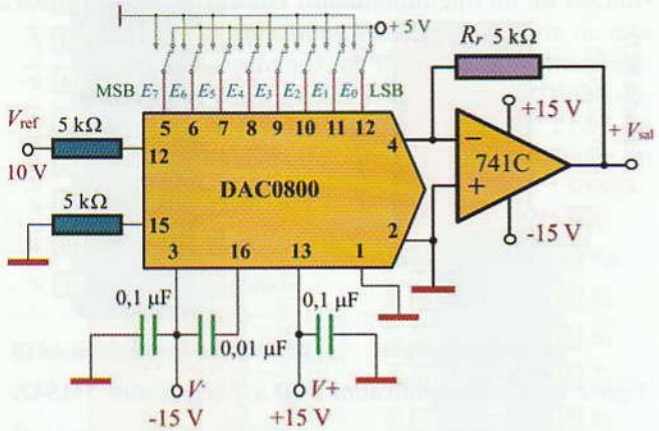


Figura 21.60. **Esquema del convertidor D/A DAC0800 para su montaje en el entrenador didáctico.**

Consulta las hojas características de este integrado, y una vez montado el circuito en el entrenador didáctico, introduce diferentes códigos binarios actuando sobre los conmutadores, y mide la tensión correspondiente en la salida (V_{sal}). Escribe una tabla con las diferentes correspondencias y determina el fondo de escala (*FE*), la constante de proporcionalidad (k) y la resolución de este convertidor.

21.7 Comprobación del funcionamiento de un convertidor analógico/digital. En la Figura 21.61 se muestra el esquema del circuito de un convertidor integrado A/D DAC0804. Antes de comenzar con esta actividad, consulta las hojas características de este integrado.

Una vez montado el circuito en el entrenador didáctico, se trata de ir regulando la tensión de entrada que se aplica por el terminal V_{IN^+} (6) mediante el potenciómetro R_1. Esta tensión de entrada analógica se convertirá en una salida digital proporcional a dicha entrada, que quedará reflejada entre los terminales 11 a 18, y que se podrá visualizar como un número binario en los diodos de salida.

Realiza varias conversiones y escribe una tabla con las diferentes correspondencias obtenidas, comprobando si éstas se corresponden con el grado de resolución del convertidor. Una vez hecho esto, introduce

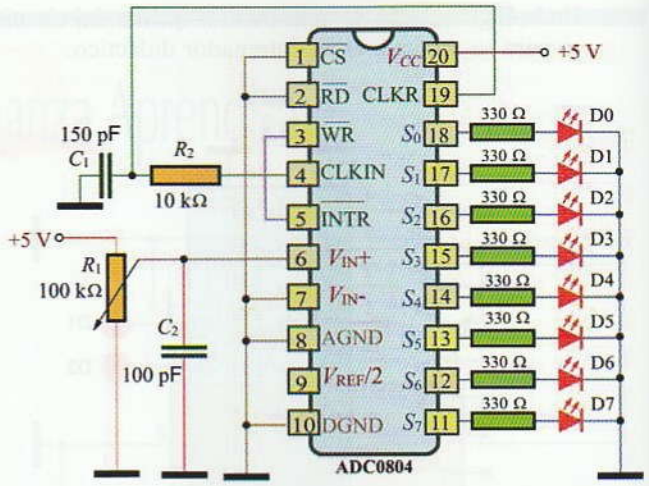


Figura 21.61. **Esquema del convertidor A/D ADC0804 para su montaje en el entrenador didáctico.**

como entrada una señal triangular o senoidal que varíe entre 0 y 5 V, con la frecuencia mínima que permita el generador de funciones. Observa el efecto que produce en la señal digital de salida a través de los diodos.

Entrada analógica V_{INT+}	Salida digitalizada D_7 D_6 D_5 D_4 D_3 D_2 D_1 D_0
0 V	0 0 0 0 0 0 0 0
0,25 V	.....
⋮	⋮
5 V	.....

Figura 21.62. **Anota los resultados obtenidos en esta tabla.**

AUTOEVALUACIÓN

21.1 Los sistemas combinacionales se caracterizan porque:

A ❑ Sus salidas sólo dependen del valor que adquieran sus entradas.

B ❑ Poseen realimentación.

C ❑ Las salidas permanecen constantes.

21.2 La función de un multiplexor es:

A ❑ Seleccionar qué salida de datos debe transmitirse a la entrada.

B ❑ Seleccionar qué entrada de datos debe transmitirse a una única salida.

C ❑ Convertir un código binario a decimal.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.3 ¿Cuántas entradas de selección serán necesarias en un multiplexor de 16 entradas?

A ❑ 2.

B ❑ 3.

C ❑ 4.

21.4 ¿Para qué sirve la entrada de inhibición (Enable) en un multiplexor?

A ❑ Invierte la multiplexión.

B ❑ Lo convierte en demultiplexor.

C ❑ Hace que funcione o no funcione el multiplexor.

21.5 Diseña un circuito combinacional con un multiplexor de 8 entradas que cumpla con la siguiente función lógica:

$$S = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + AB\bar{C}$$

21.6 La función de un demultiplexor es:

A ❑ Seleccionar a qué salida de datos deben transmitirse los datos de la entrada.

B ❑ Seleccionar qué entrada de datos debe transmitirse al variar la salida.

C ❑ Convertir un código binario a decimal.

21.7 ¿Cuántas líneas de selección de datos tendrá un demultiplexor de 16 salidas?

A ❑ 2.

B ❑ 4.

C ❑ 8.

21.8 La función de un decodificador es:

A ❑ Convertir un código decimal a binario.

B ❑ *Seleccionar qué entrada de datos debe transmitirse al variar la salida.*

C ❑ Convertir un código binario a decimal.

21.9 Diseña un circuito combinacional con un decodificador que cumpla con la siguiente función lógica:

$$S = \bar{A}\bar{B}C + \bar{A}BC + AB\bar{C} + ABC$$

21.10 ¿Qué diodos LED se tendrán que activar en un display de 7 segmentos para poder visualizar el número 3?

A ❑ a, b, c, d, g.

B ❑ d, f, e, d, g.

C ❑ a, b, c, d, e, f, g.

21.11 Para que se activen los diodos en un display de 7 segmentos con ánodo común es necesario aplicar un nivel lógico a su entrada de:

A ❑ 1.

B ❑ 0.

C ❑ Indiferente.

21.12 Para que se activen los diodos en un display de 7 segmentos con cátodo común es necesario conectarlo a un decodificador que posea sus salidas activas para un nivel lógico igual a:

A ❑ 1.

B ❑ 0.

C ❑ Indiferente.

21.13 La entrada de comprobación de un decodificador BCD a 7 segmentos, que es capaz de activar a la vez los 7 segmentos del display, tiene el nombre de:

A ❑ RBI.

B ❑ LT.

C ❑ BI/RBO.

21.14 La función del codificador es:

A ❑ Convertir un código decimal a binario.

B ❑ Seleccionar qué entrada de datos debe transmitirse al variar la salida.

C ❑ Convertir un código binario a decimal.

21.15 En un codificador con prioridad:

A ❑ En el caso de que varias entradas se activen *a la vez, sólo atiende al dígito decimal más* bajo.

B ❑ En el caso de que varias entradas se activen a la vez, desactiva el codificador.

C ❑ En el caso de que varias entradas se activen a la vez, sólo atiende al dígito decimal más alto.

21.16 De los siguientes dispositivos, ¿cuál transforma una señal digital en una analógica?

A ❑ DAC.

B ❑ ADC.

C ❑ Amplificador lineal.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

21.17 ¿Cuántos niveles de tensión diferentes es capaz de producir un DAC de 8 bits?

A ❑ 128.

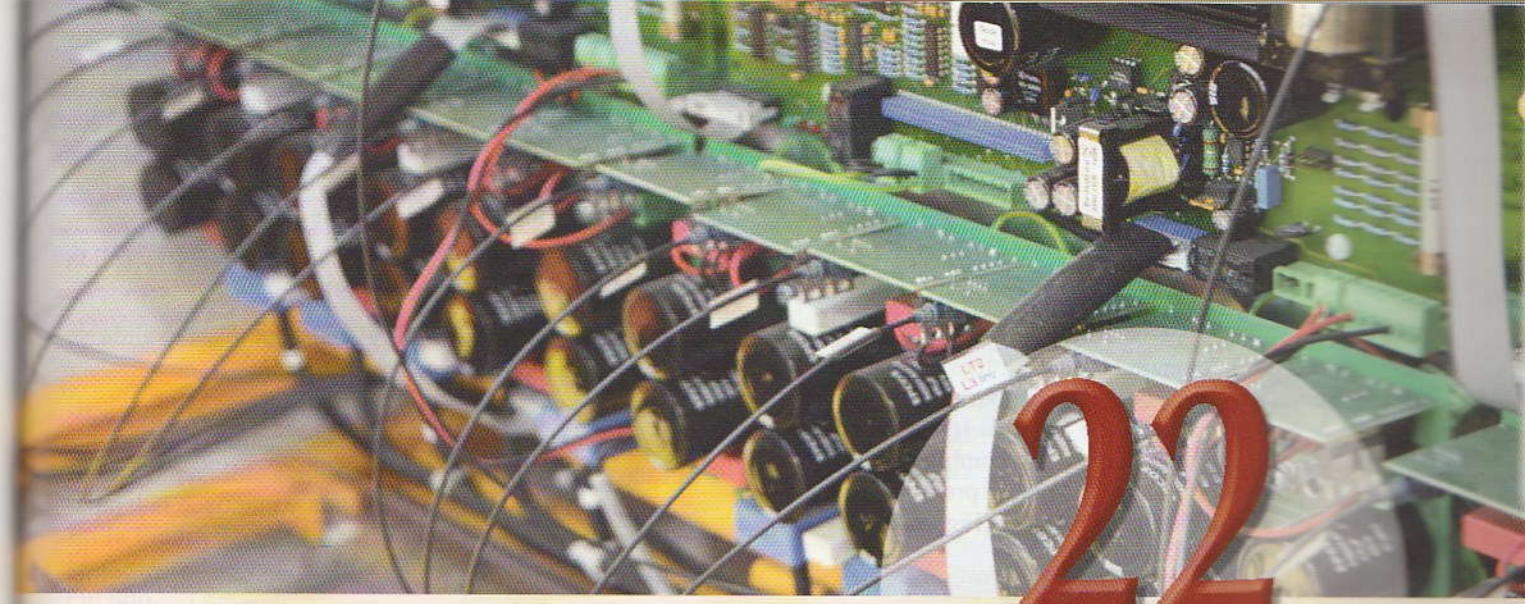
B ❑ 256.

C ❑ 1.024.

21.18 Un convertidor A/D de 8 bits posee una tensión de fondo de escala de 5 V. Calcula: a) El número de códigos distintos que pueden aparecer en la salida. b) Su resolución en voltios. c) El código binario en la salida para una tensión de entrada de 3 V.

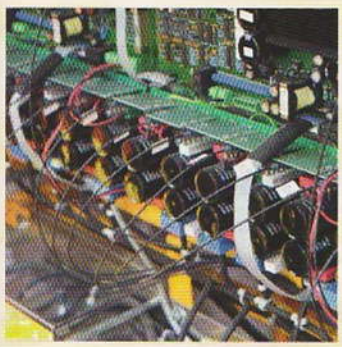
© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



22

Sistemas secuenciales



Los biestables cumplen con una función muy importante en la electrónica digital. Así, por ejemplo, se pueden utilizar para medir la frecuencia, contar el tiempo, generar señales de forma secuencial, memorizar registros (palabras en código binario), etc. Los biestables se utilizan fundamentalmente para almacenar un bit binario, representado por un estado eléctrico alto o bajo. El circuito secuencial más simple es un biestable tipo R-S, *a partir del cual se construyen otros tipos de biestables como el* J-K, *el* D *y el* T.

Contenido

22.1. **Realimentación en un circuito digital**
22.2. **Biestable *R-S***
22.3. **Biestable *J-K* asincróno**
22.4. **Biestable *D* síncrono activado por flanco**
22.5. **Biestable síncrono *T***
22.6. **Biestables síncronos integrados con señales de Preset y Clear**
22.7. **Registros**
22.8. **Contadores**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Conocer los diferentes tipos de biestables y sus características.
- Diferenciar entre un biestable síncrono y un asíncrono.
- Verificar el funcionamiento básico de los sistemas secuenciales básicos.
- Montar y simular circuitos con biestables.
- Verificar el funcionamiento y conocer las aplicaciones de los registros y contadores.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

22.1 Realimentación en un circuito digital

El principio de funcionamiento de un biestable se basa en la realimentación, que consiste en tomar parte de la información de la señal presente en la salida (Q_t) e introducirla en alguna de las entradas del circuito combinacional, de tal forma que la nueva salida (Q_{t+1}) que se produzca dependerá del estado anterior de la salida (Q_t) (Figura 22.1).

Figura 22.1. Realimentación en un circuito combinacional.

22.1.1. Realimentación en un circuito estable

Para entender mejor estos conceptos vamos a poner un ejemplo muy sencillo. En la Figura 22.2 se ha conectado un pulsador E_1 a una puerta OR de dos entradas y se ha tomado la señal de salida y se ha conectado a la otra entrada de la puerta lógica, estableciendo una red de realimentación.

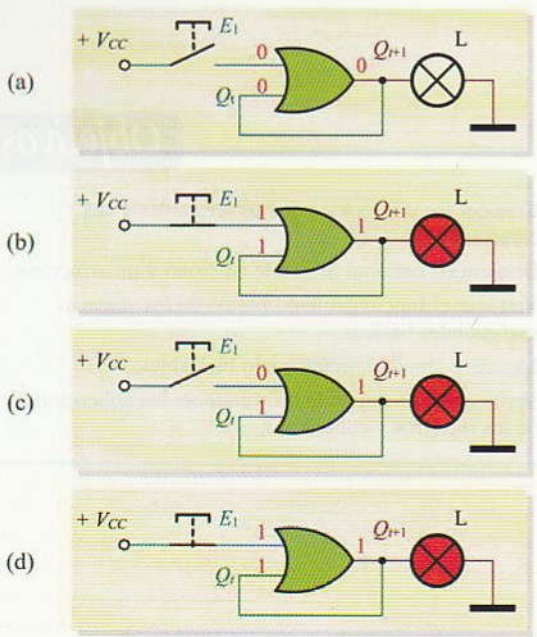


Figura 22.2. Puerta OR realimentada.

El funcionamiento se podría resumir así:

- Figura 22.2(a): inicialmente y sin pulsar E_1, la salida permanece inactiva y la lámpara apagada.
- Figura 22.2(b): al accionar el pulsador E_1, la salida se activa y la lámpara se enciende.
- Figura 22.2(c): al dejar de pulsar E_1, la salida sigue activa ($Q_{t+1} = 1$) gracias a la realimentación ($Q_t = 1$) que al estar conectada a una de las entradas de la puerta OR consigue un «1» lógico en la salida y mantiene la lámpara encendida.
- Figura 22.2(d): aunque volvamos a pulsar E_1, la salida no cambia y la lámpara permanece encendida de forma indefinida.

En la Figura 22.3 se muestra la tabla de la verdad de este circuito en la misma secuencia que hemos explicado su funcionamiento. Aclararemos que: Q_t es el estado de la salida en el momento de accionar el pulsador de entrada; y Q_{t+1} es el cambio que se produce en la salida una vez accionado dicho pulsador, es decir un tiempo después.

	Entradas		Salida	
Fig.	E_1	Q_t	Q_{t+1}	Estado de la salida
(a)	0	0	0	L apagada
(b)	1	0	1	Se pulsa E_1 y L se enciende
(c)	0	1	1	Aunque no se pulse E_1, L sigue encendida
(d)	1	1	1	Si se vuelve a pulsar E_1, L sigue encendida

Q_t = salida en el momento de accionar el pulsador E_1
Q_{t+1} = salida un tiempo después de accionar el pulsador E_1

Figura 22.3. Tabla de la verdad del circuito realimentado.

El circuito que acabamos de estudiar podríamos decir que posee memoria, ya que es capaz de recordar la acción del pulsador, aun después de haberlo dejado de pulsar. También se podría afirmar que es un circuito estable de un solo estado y que una vez que la salida se pone a «1» (lámpara encendida), ese «1» ya no se puede borrar (la lámpara no se puede apagar).

22.1.2. Realimentación en un circuito biestable

¿Cómo podríamos apagar la lámpara del circuito de la Figura 22.2, una vez de activado el pulsador E_1?

Para ello deberíamos conseguir que el circuito tuviese dos estados posibles (biestable), uno para encendido y otro para apagado. En la Figura 22.4 se muestra el circuito que se propone para dar solución a este planteamiento. La idea es añadir un pulsador E_2, de tal forma que al accionarlo apague la lámpara.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

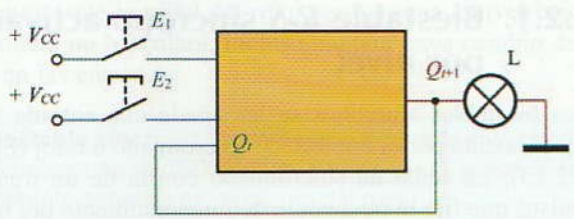


Figura 22.4. Diagrama de bloques para el apagado y encendido de la lámpara con dos pulsadores.

En la Figura 22.5 se ha realizado la tabla de la verdad que se corresponde con el funcionamiento deseado para este circuito.

Entradas			Salida	
E_1	E_2	Q_t	Q_{t+1}	Estado de la salida
0	0	0	0	L apagada
1	0	0	1	Se pulsa E_1 y L se enciende
0	0	1	1	Aunque no se pulse E_1, L sigue encendida
1	0	1	1	Si se vuelve a pulsar E_1, L sigue encendida
0	1	1	0	Se pulsa E_2 y L se apaga
1	0	1	0	Si se vuelve a pulsar E_2, L sigue apagada
1	1	0	X	Estado prohibido
1	1	1	X	Estado prohibido

Q_t = salida en el momento de accionar uno de los pulsadores
Q_{t+1} = salida un tiempo después de accionar uno de los pulsadores

Figura 22.5. Tabla de la verdad para un circuito con dos estados de salida.

Para implementar el circuito lógico que cumpla con esta tabla de la verdad, pasaremos primero a simplificar la función obtenida mediante el mapa de Karnaugh, tal como se muestra en la Figura 22.6, obteniéndose la siguiente función de salida.

$$S = Q_{t+1} = E_1 + \overline{E}_2 \cdot Q_t$$

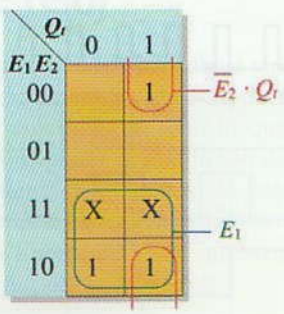


Figura 22.6. Mapa de Karnaugh para la simplificación de la función.

En la Figura 22.7 se muestra el circuito que implementa esta función.

Si ahora aplicamos los teoremas de Morgan podríamos realizar este mismo circuito con puertas NAND, el resultado es el que se muestra en la Figura 22.8.

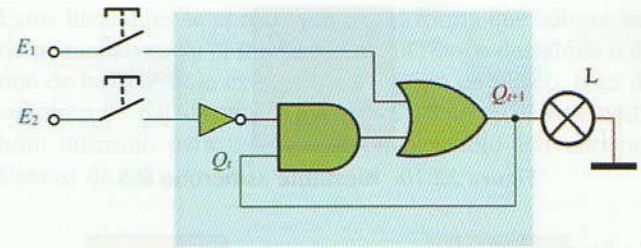


Figura 22.7. Circuito simplificado.

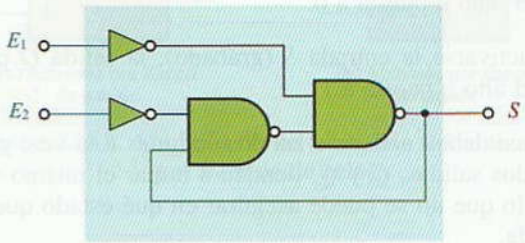


Figura 22.8. Circuito con puertas NAND.

En la práctica resulta más habitual encontrarnos este tipo de circuito ordenado como en la Figura 22.9(a). Aquí se han dispuesto dos posibilidades de salida, S y $\overline{S}$ que toman valores opuestos. En la Figura 22.9(b) se muestra el circuito resuelto con puertas NOR.

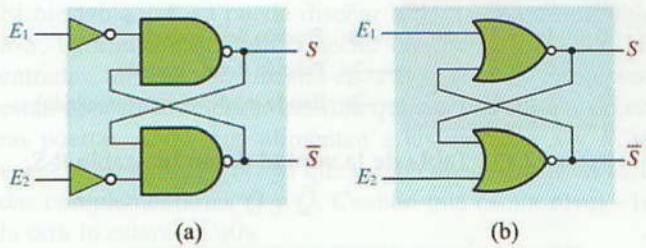


Figura 22.9. Circuito interno de un biestable. (a) Con puertas NAND. (b) Con puertas NOR.

A los circuitos conseguidos en la Figura 22.9 se les conoce por el nombre de biestables o flip-flop. El nombre se debe a que tienen la posibilidad de alcanzar dos estados estables.

22.2 Biestable *R-S*

En la Figura 22.10 se muestra un biestable *R-S* asíncrono construido como un solo bloque. Su circuito interno es el que ya hemos analizado en la Figura 22.9. Es un circuito que posee dos entradas R (*reset* – borrar) y S (*set* – grabar) y dos salidas, Q y $\overline{Q}$, que toman valores opuestos. Estas salidas son complementarias, de tal forma que cuando una esté en alto («1» lógico), la otra estará en bajo («0» lógico).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

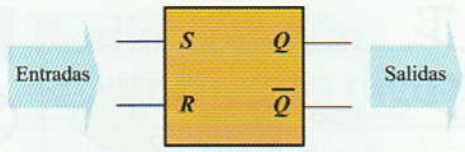


Figura 22.10. **Biestable asíncrono *R-S*.**

Su funcionamiento es como sigue:

- Al activarse la entrada *R* (reseteado), la salida *Q* pasa a nivel bajo o puesta a 0.
- Al activarse la entrada *S* (grabado), la salida *Q* pasa a nivel alto o puesta a 1.
- Nunca deben activarse las dos entradas a la vez, ya que las dos salidas, *Q* y $\overline{Q}$, tienden a tomar el mismo valor, por lo que no se puede asegurar en qué estado queda la salida.

En la Figura 22.11 se muestra su tabla de la verdad, y en la Figura 22.12 un cronograma con las señales de entrada y las señales obtenidas en las salidas en función de las primeras y en el transcurso del tiempo.

R	*S*	*Q*	$\overline{Q}$	
0	0	0	1	
0	1	1	0	→ Función Set - grabado
1	0	0	1	→ Función Reset - borrado
1	1	X	X	→ Estado indeterminado (prohibido)

Figura 22.11. **Tabla de la verdad de un biestable *R-S*.**

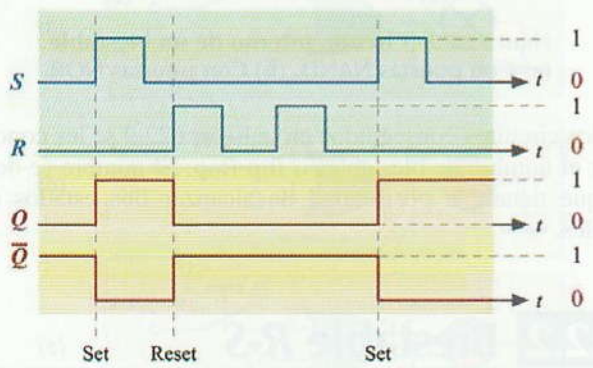


Figura 22.12. **Cronograma de señales de un biestable *R-S*.**

Tal como hemos podido comprobar, el biestable *R-S* asíncrono posee un estado indefinido cuando ambas entradas están a nivel alto. Para evitar esta situación existen otros biestables como los *J-K* que estudiaremos más adelante.

22.2.1. Biestable *R-S* síncrono activado por nivel

A los biestables síncronos se les añade una entrada más (*Ck*), conocida por el nombre de sincronismo o reloj (Figura 22.13). La señal de sincronismo consta de un tren de impulsos que fija la frecuencia de funcionamiento del biestable, de tal forma que las señales de entrada sólo pueden provocar una variación en el estado de la salida si hay presente señal de sincronismo, tal como se muestra en el cronograma de la Figura 22.15.

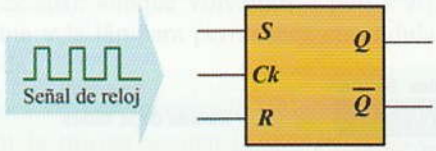


Figura 22.13. **Símbolo del biestable *R-S* síncrono.**

En la Figura 22.14 se muestra el circuito interno con puertas lógicas de un biestable *R-S* síncrono, al que se le han añadido dos puertas NAND para conectar la entrada *Ck* de sincronismo.

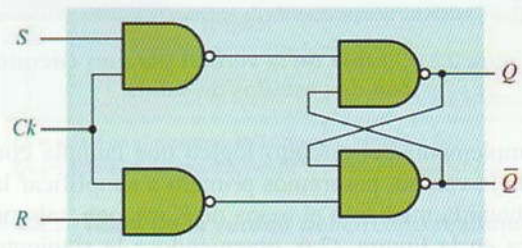


Figura 22.14. **Estructura interna de un biestable *R-S* síncrono.**

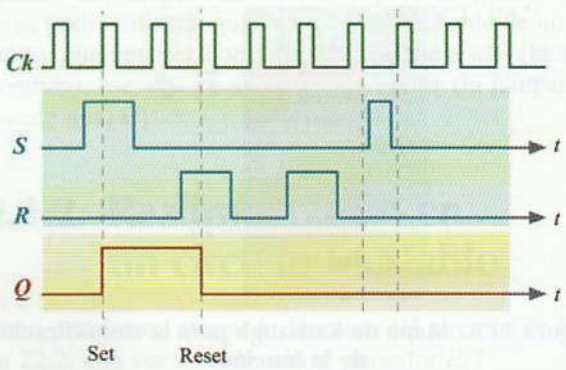


Figura 22.15. **Cronograma de un biestable *R-S* síncrono.**

En el cronograma de este biestable podemos observar cómo la entrada *S* sólo produce un cambio en la salida *Q* cuando coincide con una señal activa de nivel alto en la señal de sincronismo, lo mismo ocurre con la entrada *R*.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Mientras que la señal del reloj permanezca a nivel bajo, el biestable no basculará, incluso aunque haya cambio de nivel en las entradas.

Biestable síncrono: las señales de entrada sólo pueden provocar una variación en el estado de la salida si hay presente señal de sincronismo del reloj.

Biestable asíncrono: las señales de entrada pueden provocar una variación en el estado de la salida en todo instante.

Si analizamos la tabla de la verdad de la Figura 22.16, seguimos observando un estado de inestabilidad en la salida de este biestable, que se produce cuando la señal de sincronismo del reloj y las dos entradas están a nivel alto. Cuando se da esta coincidencia no se puede asegurar qué nivel adoptará la salida.

Entradas			Q_{t+1} Salida	
Ck	*R*	*S*	*Q*	
0	X	X	Q_t	→ No hay señal de sincronismo
1	0	0	Q_t	
1	0	1	1	→ Función Set - grabado
1	1	0	0	→ Función Reset - borrado
1	1	1	X	→ Estado indeterminado

Q_t = nivel de salida anterior al pulso de reloj

Figura 22.16. Tabla de la verdad de un biestable *R-S* síncrono.

22.2.2. Biestable *R-S* síncrono activado por flancos de reloj

Una forma de evitar que los biestables síncronos presenten funcionamientos inesperados sería la de acortar el tiempo de los pulsos de sincronismo todo lo que sea posible. La forma de hacerlo es poner la condición de que el biestable sólo tenga en cuenta los flancos de subida o de bajada (transiciones) de la señal de sincronismo para producir la activación. En la Figura 22.17 se muestran los parámetros típicos de una señal de sincronismo.

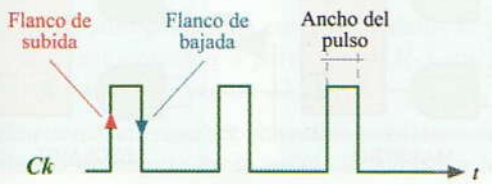


Figura 22.17. Señal de sincronismo.

Estos biestables se construyen de tal forma que sólo se activan cuando se da la transición de un flanco de subida o de uno de bajada. Sólo es sensible a un tipo de flanco, bien de subida o de bajada. En la Figura 22.18 se muestra el símbolo utilizado para representar un biestable activado por flancos de reloj.

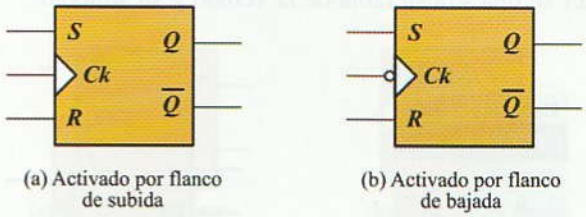


Figura 22.18. Símbolo de un biestable *R-S* activado por flancos de reloj.

22.3 Biestable *J-K* asíncrono

El biestable *J-K* es muy similar al *R-S*, con la importante modificación de eliminar la condición de salida no permitida que se da cuando ambas entradas se encuentran a nivel alto.

El biestable *J-K* se puede diseñar a partir de un biestable *R-S*. Para ello basta con conectar dos puertas AND a las entradas, tal como se muestra en la Figura 22.19. Tal como están conectadas, será imposible que las dos salidas de estas puertas AND, que alimentan a las entradas *S* y *R*, se encuentren a nivel «1», ya que están conectadas a las salidas complementarias Q y $\overline{Q}$. Cuando una está a nivel «1» la otra lo estará en «0».

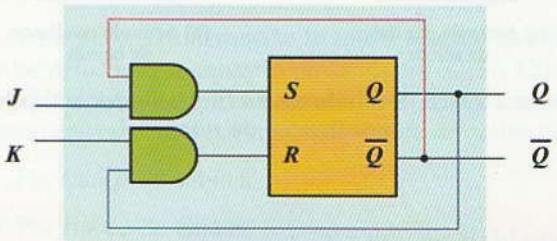


Figura 22.19. Biestable asíncrono *J-K* a partir de un *R-S*.

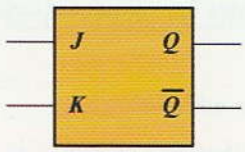


Figura 22.20. Símbolo del biestable asíncrono *J-K*.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

22.3.1. Biestable *J-K* síncrono

Si añadimos una entrada de reloj a un biestable *J-K* este pasará a funcionar en modo síncrono. Su funcionamiento será el mismo que el biestable *R-S* síncrono, al que se le ha eliminado la condición de salida no permitida. En la Figura 22.21 se muestra su tabla de la verdad y su símbolo.

Entradas			Salida
Ck	J	K	Q_{t+1}
0	X	X	Q_t
1	0	0	Q_t
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	Q_t

Q_t = nivel de salida anterior al pulso de reloj

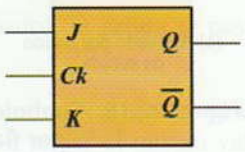


Figura 22.21. Tabla de la verdad y símbolo de un biestable *J-K* síncrono.

De la tabla de la verdad se deduce que el problema de la inestabilidad todavía existe, ya que cuando se da la condición de que las entradas *J* y *K* están a nivel «1», los estados internos *S* y *R* irán cambiando de «1» a «0» y de «0» a «1» según lo hagan las salidas.

Este biestable también se puede construir para que sólo sea sensible a señales de reloj por flancos, bien de subida o de bajada. En la Figura 22.22 se muestran sus símbolos.

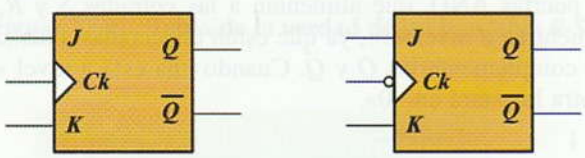


Figura 22.22. Símbolo de un biestable *J-K* activado por flancos de reloj.

Actividad resuelta 22.1

A un biestable *J-K* síncrono se le aplican las señales de entrada que se muestran en la Figura 22.23. Dibuja la señal de salida *Q* si el biestable se encuentra inicialmente en reset para los siguientes casos de activación:

a) Por nivel.

b) Por flanco de subida.

c) Por flanco de bajada.

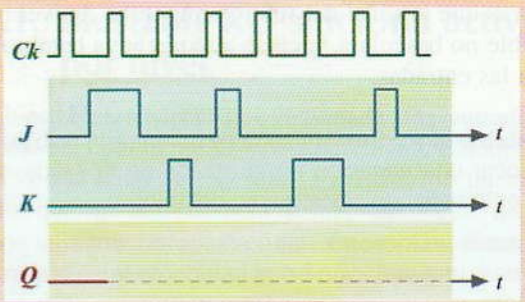


Figura 22.23. Dibujar la señal de salida Q.

Solución: Veáse Figura 22.24.

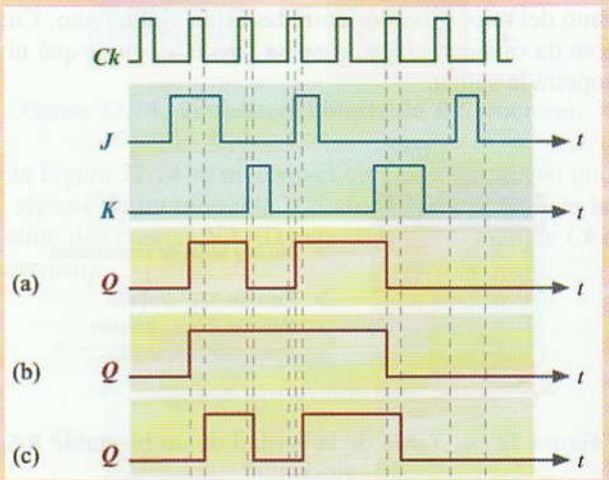


Figura 22.24. Salida Q para un biestable activado por: (a) nivel, (b) flanco de subida, (c) flanco de bajada.

22.3.2. Biestable *J-K* maestro-esclavo

Este biestable se diseña de tal forma que se evite el problema de inestabilidad que se presenta en la salida cuando las dos entradas proporcionan un mismo nivel igual «1».

En la Figura 22.25 se muestra el circuito interno de un biestable *J-K* maestro-esclavo. Este biestable consta de blo-

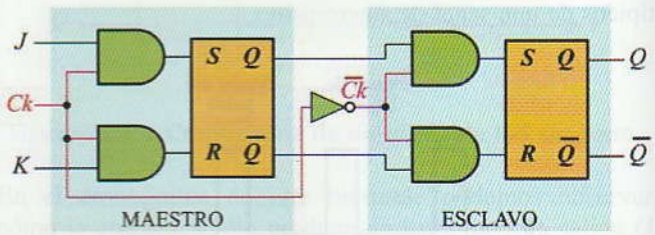


Figura 22.25. Diagrama lógico de un biestable *J-K* maestro-esclavo.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

ques funcionales: el maestro y el esclavo. El maestro es básicamente igual a un biestable *J-K* con entrada de reloj. Por otro lado, el esclavo es básicamente igual pero al que se le ha invertido el pulso del reloj y sus entradas son controladas por las salidas del maestro.

En la Figura 22.26 se muestra la tabla de la verdad de este biestable.

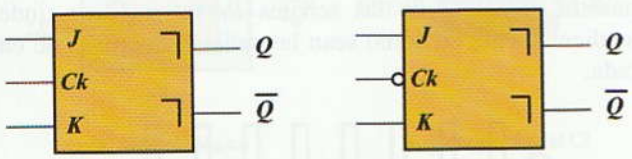
Entradas			Salida Q_{t+1}	
Ck	J	K	Q	
1	0	0	Q_t	→ No hay cambio
1	0	1	0	→ Función Reset - borrado
1	1	0	1	→ Función Set - grabado
1	1	1	Q_t	→ Basculación

Q_t = nivel de salida anterior al pulso de reloj
Q_{t+1} = nivel de salida después del pulso de reloj

Figura 22.26. Tabla de la verdad de un biestable *J-K* maestro-esclavo.

El funcionamiento de este biestable es muy parecido al *J-K* activado por flanco de reloj: en el nivel alto (o bajo) se aceptan los valores de las entradas *J* y *K* y en el flanco de bajada (o de subida) se transfieren a la salida. Para el caso de que las dos entradas estén a nivel «1», la salida bascula de forma consecutiva entre el «0» y el «1».

En la Figura 22.27 se muestran los símbolos utilizados para este biestable, que puede ser activado mediante flanco de reloj de nivel alto o bajo.



(a) Activado a nivel alto (b) Activado a nivel bajo

Figura 22.27. Símbolos lógicos de un biestable *J-K* maestro-esclavo.

22.4 Biestable *D* síncrono activado por flanco

Este biestable sólo posee una entrada de datos *D* y una de reloj, y se puede construir a partir de un *R-S* síncrono, tal como se muestra en la Figura 22.28.

Se pueden construir para ser activados por flanco de subida o por flanco de bajada de la señal de reloj. En la Figura 22.29 se muestran los símbolos lógicos utilizados para este biestable.

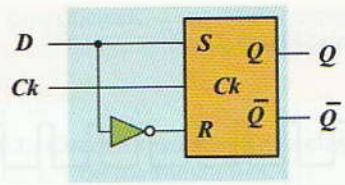
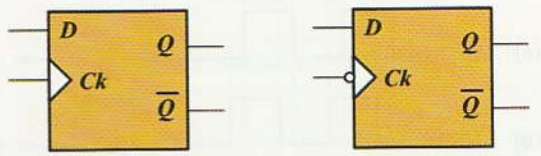


Figura 22.28. Diagrama lógico de un biestable síncrono *D*.



(a) Activado por flanco de subida (b) Activado por flanco de bajada

Figura 22.29. Símbolo lógico de un biestable *D* activado por flanco.

Su funcionamiento es muy simple, ya que el nivel de la señal de salida *Q* es exactamente igual a la de la entrada de datos *D*, siempre y cuando ocurra mientras exista un flanco activo de la señal de reloj.

En la Figura 22.30 se muestra la tabla de la verdad que describe el funcionamiento de este biestable.

Entradas		Salida	
Ck	D	Q	
1	1	1	→ Función Set - memoriza un «1»
1	0	0	→ Función Reset - memoriza un «0»

Figura 22.30. Tabla de la verdad del biestable *D* síncrono.

Actividad resuelta 22.2

A un biestable *D* síncrono se le aplica la señal de entrada de datos que se muestra en la Figura 22.31. Dibuja la señal de salida *Q* si el biestable se encuentra inicialmente en reset para los siguientes casos de activación:

a) Por flanco de subida.

b) Por flanco de bajada.

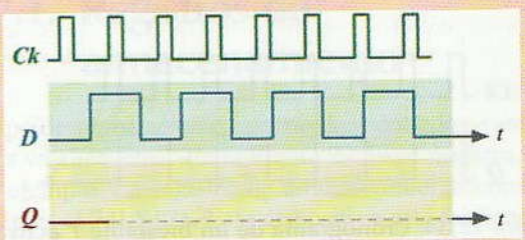


Figura 22.31. Dibujar la señal de salida Q.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución: Veáse Figura 22.32.

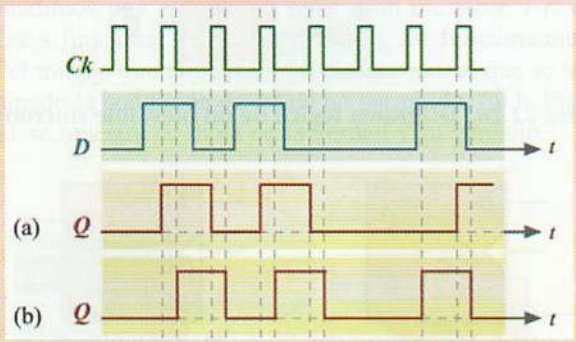


Figura 22.32. Salida Q para un biestable *D* activado por: (a) flanco de subida, (b) flanco de bajada.

22.5 Biestable síncrono *T*

Si unimos las dos entradas de datos de un biestable síncrono *J-K* se forma un biestable tipo *T* (Figura 22.33).

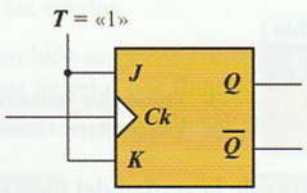


Figura 22.33. Biestable *T* a partir de un *J-K* disparado por flanco de subida.

La entrada *T* se fija a nivel alto «1». Cada vez que recibe un flanco activo a través de la señal del reloj, la señal de salida *Q* cambia de estado. El nombre de *T* proviene del término en inglés *Toggling* que significa cambiar de estado o bascular. Una de las aplicaciones que tienen estos biestables es la construcción de contadores asíncronos.

En la Figura 22.34 se explica el funcionamiento de un biestable *T* a través de su cronograma.

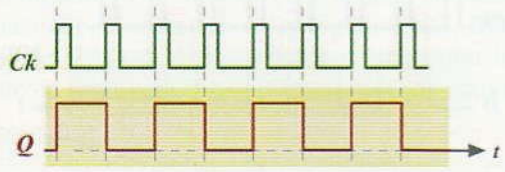


Figura 22.34 Cronograma de un biestable *T* activado por flanco de subida.

22.6 Biestables síncronos integrados con señales de Preset y Clear

Lo habitual es que los circuitos que conforman los biestable síncronos se integren en un solo chip o circuito integrado. Con el fin de tener más control sobre el biestable, estos circuitos suelen disponer de un par de entradas asíncronas (*Preset* y *Clear*) que tienen como fin poner al biestable en estado «1» o estado «0», independientemente de las señales del reloj (Figura 22.35):

Preset: pone el biestable a «1».

Clear: pone el biestable a «0».

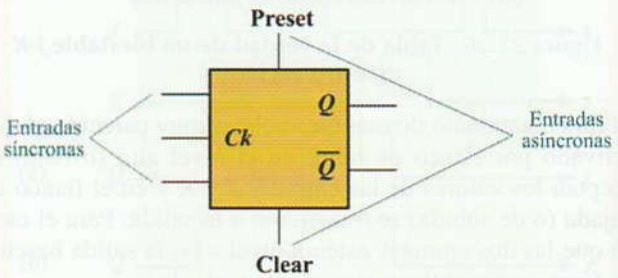


Figura 22.35. Biestable síncrono con entradas de *Preset* y *Clear*.

Para entender mejor estos conceptos, en la Figura 22.36 se muestra el efecto de las señales *Preset* y *Clear*, independientemente de cómo sean las señales síncronas de entrada.

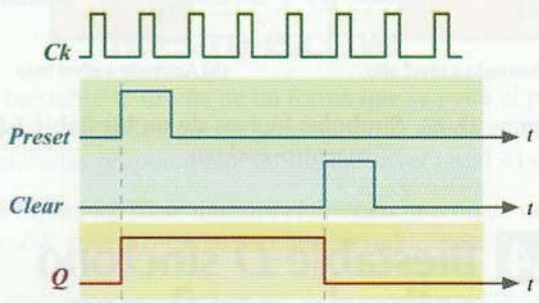


Figura 22.36. Efecto de las señales *Preset* y *Clear* en un biestable síncrono.

En la Figura 22.37 se muestra el símbolo lógico de un biestable *J-K* síncrono con entradas de *Preset* y *Clear*. Observa cómo estas entradas se activan a nivel bajo (con un «0» lógico), por lo que para el funcionamiento del biestable deben mantenerse a nivel alto (con un «1» lógico).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

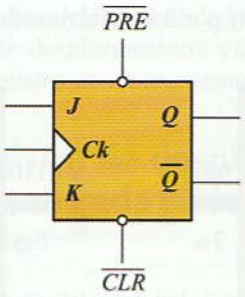
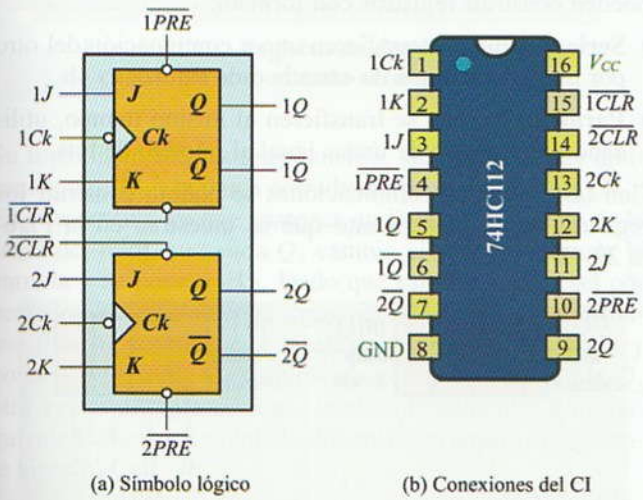


Figura 22.37. Biestable *J-K* con entrada de inicialización (*Preset*) y de borrado (*Clear*) activas a nivel bajo.

Con la referencia 74HC112 se fabrica un doble biestable *J-K* síncrono de tecnología CMOS. Este circuito integrado contiene dos biestables iguales para ser activados por flanco de bajada, al que se le han añadido dos entradas de inicialización (*Preset*) y de borrado (*Clear*) activas a nivel bajo. En la Figura 22.38 se muestra el símbolo lógico y la disposición de terminales de este CI.



(a) Símbolo lógico (b) Conexiones del CI

Figura 22.38. Doble biestable *J-K* 74HC112.

En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de este circuito integrado.

Actividad propuesta 22.1

Busca las hojas de características del circuito integrado 74AHC74 y contesta a las siguientes preguntas:

a) ¿A qué familia lógica pertenece?

b) ¿Qué tipo de circuito contiene?

c) Dibuja su símbolo lógico y la disposición de terminales de este CI.

Para terminar proponemos, a modo de resumen, una clasificación de los biestables estudiados en esta unidad didáctica (veáse Tabla 22.1).

Tabla 22.1. Cuadro resumen de la clasificación de los biestables.

Por sus entradas	*R-S*
	J-K
	J-K maestro esclavo
	D
	T
Por su funcionamiento	**Asíncronos:** las señales de entrada actúan en todo instante.
	Síncronos: las señales de entrada sólo pueden provocar una variación en el estado de la salida si hay presente señal de sincronismo del reloj.
Por su activación	Niveles.
	Flanco de subida.
	Flanco de bajada.

22.7 Registros

Una de las aplicaciones prácticas de los biestables es la construcción de registros. Estos dispositivos se construyen con un número *n* de biestables y son capaces de almacenar datos digitales de *n* bits.

Existen muchos tipos de registros y se utilizan para multitud de aplicaciones, como por ejemplo la construcción de los registros de aproximaciones sucesivas de los convertidores A/D, dispositivos para retardar un bit un número determinado de ciclos de reloj, construcción de contadores electrónicos, etc.

22.7.1. Registros de almacenamiento

Este tipo de registros se compone de *n* entradas, tantas como bits va almacenar. En la Figura 22.39 se muestra, a modo de ejemplo, un registro de almacenamiento comercial, como lo es el 74LS171. Este dispositivo está fabricado con la tecnología TTL y es capaz de almacenar 4 bits de información. La información se introduce de forma simultánea

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

(**carga paralela**) a través de sus cuatro entradas D_0, D_1, D_2 y D_3. Cuando se inyecta una señal de reloj por *Ck*, en el primer flanco de subida se almacenan los datos en el registro, quedando a nuestra disposición en las salidas Q_0, Q_1, Q_2 y Q_3, o en las negadas, según convenga en cada aplicación. Para borrar (*resetear*) los datos almacenados en el registro, basta con aplicar un «0» lógico al terminal de $\overline{CLR}$.

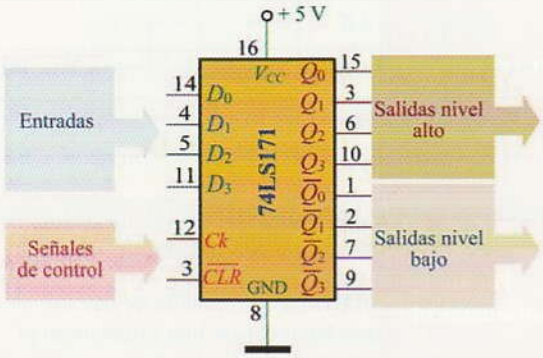


Figura 22.39. Registro de almacenamiento de 4 bits 74LS171.

Para la construcción de este registro se han utilizado cuatro biestables, tal como se muestra en la Figura 22.40.

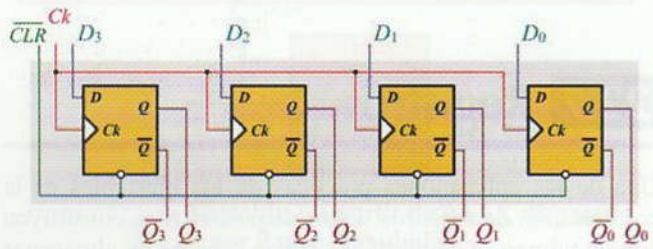


Figura 22.40. Constitución interna del registro de almacenamiento de 4 bits 74LS171.

22.7.2. Registros de desplazamiento

Los registros de desplazamiento, al igual que los de almacenamiento, guardan la información digital que previamente se ha cargado en la entrada, pero en este caso desplazan los dígitos de entrada hacia la izquierda o hacia la derecha dependiendo del tipo de conexión.

Así, por ejemplo, supongamos que disponemos de un registro de desplazamiento de 4 bits. Y que se le aplica a su entrada la información binaria 0110 (6_{10}). Si el registro desplaza la información hacia la derecha, tendremos un resultado final de 0011 (3_{10}), y si la desplaza hacia la izquierda 1100 (12_{10}), consiguiendo de una forma simple multiplicar o dividir por 2 la información de entrada (Figura 22.41).

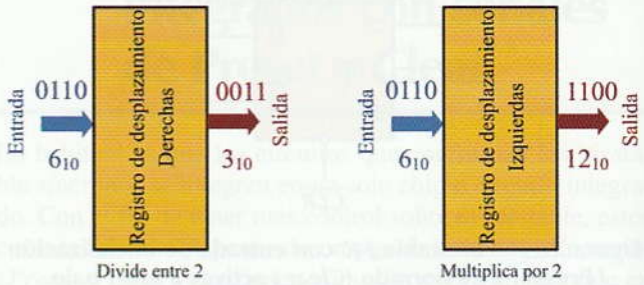


Figura 22.41. Registro de desplazamiento moviendo dígitos hacia la derecha o hacia la izquierda.

Los registros de desplazamiento se suelen construir mediante varios biestables de tipo *D*, conectados en cascada, y que se van activando de forma síncrona con la misma señal de reloj. Dependiendo de cómo introduzcamos la información digital y de cómo la obtengamos a la salida, se pueden construir registros con formato:

- **Serie:** los bits se transfieren uno a continuación del otro por una misma línea de entrada o de salida.
- **Paralelo:** los bits se transfieren al mismo tiempo, utilizando un número de líneas igual al número de bits.

Con las diferentes combinaciones se podrán construir los registros de desplazamiento que se muestran en la Figura 22.42.

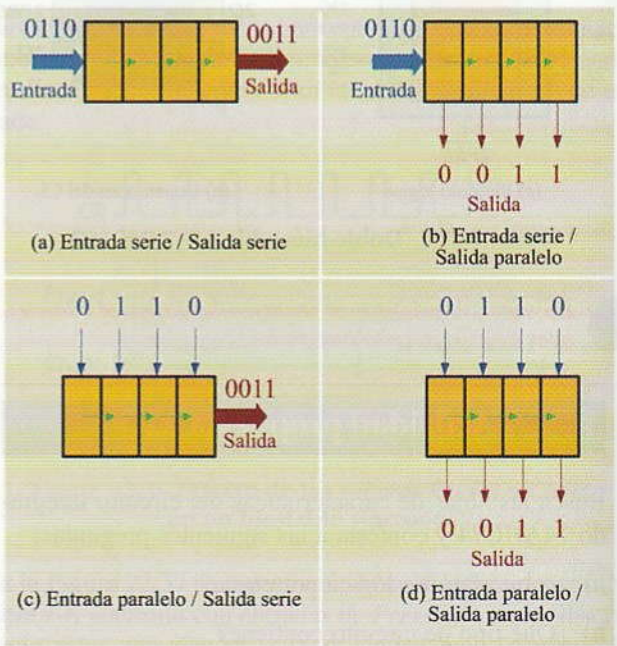


Figura 22.42. Tipos de registros de desplazamiento en función de la forma en la que se transfieren los bits de información.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

El registro paralelo/paralelo en realidad no se puede considerar un registro de desplazamiento, ya que en sí mismo trabaja como un registro de almacenamiento.

22.7.2.1. Registro de desplazamiento con entrada serie y salida serie

Únicamente la entrada del primer biestable y la salida del último son accesibles externamente. Su principal aplicación es la construcción de líneas de retardo digitales y en acciones de sincronización. En la Figura 22.43 se muestra la constitución de un registro de desplazamiento de este tipo de 4 bis construido con cuatro biestables tipo *D*.

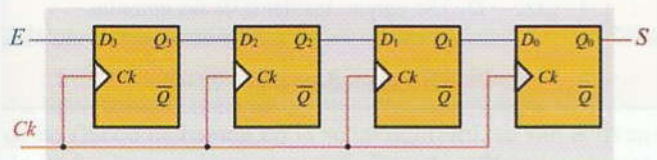


Figura 22.43. Registro de desplazamiento de cuatro bis con entrada serie y salida serie.

Su funcionamiento es muy sencillo, supongamos que aplicamos un «1» a la única entrada del primer biestable (D_3). En el momento en que aparezca un flanco ascendente de la señal del reloj, su salida Q_3 cambia al mismo valor de la entrada y se pone a «1». Dado que este biestable está conectado en cascada con el siguiente ($Q_3 - D_2$), en el próximo flanco ascendente el biestable número dos bascula y pone su salida Q_2 a «1», volviendo a quedar la salida Q_3 otra vez a «0» que es como estaba inicialmente. En el siguiente flanco ascendente la información pasará al siguiente biestable, etc.

En la Figura 22.44 se muestra la activación de la salida de los biestables para cada uno de los flancos ascendentes de reloj si introducimos a la entrada el número binario 0110.

Ck	E	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	S
↓1	0	0	0	0	0	0
↓2	1	1	0	0	0	0
↓3	1	1	1	0	0	0
↓4	0	0	1	1	0	0
↓5	0	0	0	1	1	1
↓6	0	0	0	0	1	1
↓7	0	0	0	0	0	0

Datos almacenados en el registro

En los siguientes pulsos de reloj, los datos salen en serie por la salida

Figura 22.44. Ejemplo de activación paso a paso en registro de desplazamiento con entrada serie y salida serie para una entrada del número binario 0110.

22.7.2.2. Registro de desplazamiento con entrada serie y salida paralelo

En este registro es accesible sólo la entrada del primer biestable, mientras que tenemos acceso al exterior de todos los biestables (Figura 22.45). Estos registros son muy útiles para la conversión de datos en serie a paralelo.

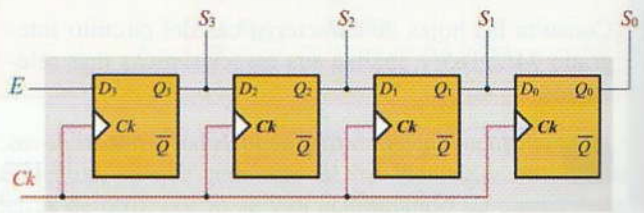


Figura 22.45. Registro de desplazamiento de cuatro bis con entrada serie y salida paralelo.

22.7.2.3. Registro de desplazamiento con entrada paralelo y salida serie

La estructura interna de este registro es un poco más compleja que las de los que hemos estudiado hasta ahora, ya que la carga de datos en paralelo requiere de circuitos específicos. A modo de ejemplo, en la Figura 22.46 se muestran las conexiones del registro de desplazamiento comercial 74LS165. Este circuito integrado es de 8 bits y convierte los datos digitales introducidos por las entradas paralelas D_7 a D_0 en datos serie a través de su única salida Q_7.

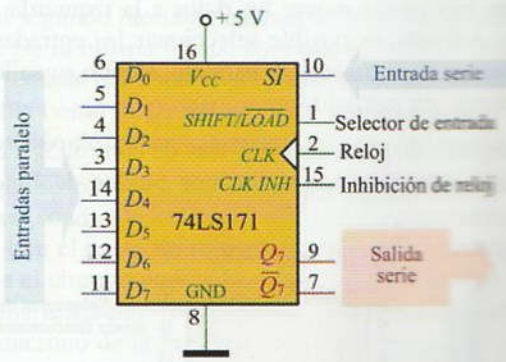


Figura 22.46. Registro paralelo serie 74LS165 de 8 bits.

Este circuito también tiene la posibilidad de funcionar como registro serie-serie, ya que dispone de una entrada serie. Para cargar los datos en las entradas en paralelo, hay que aplicar a la entrada de selección SHIFT/LOAD un «0» lógico. Si lo que deseamos es que el registro funcione en modo de desplazamiento, entonces habrá que aplicar a esta entrada un «1» lógico. Además se le ha añadido una señal

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

de inhibición del reloj CLK INH, de tal forma que cuando se activa esta entrada de selección con un «1» lógico, se desconecta el paso de los pulsos del reloj hacia el registro. Para que el registro trabaje como serie-serie, basta con que la entrada de selección SHIFT/LOAD esté activada con «1» lógico.

Actividad propuesta 22.2

Consulta las hojas de características del circuito integrado 74LS165 y analiza sus características más relevantes.

*** En www.paraninfo.es se incluyen las hojas de características de este integrado.*

22.7.2.4. Registros de desplazamiento bidireccionales y universales

Hasta ahora todos los registros de desplazamiento que hemos estudiado mueven los datos hacia la derecha. En el caso de necesitar mover los datos hacia la izquierda del registro, se pueden utilizar circuitos que sean capaces de desplazar los datos en ambos sentidos, como lo son los bidireccionales que disponen de una línea de control para seleccionar la dirección en la que se desea mover los datos.

Hoy en día se comercializan registros de desplazamiento universales que están preparados para funcionar en cualquiera de las formas aquí expuestas, como por ejemplo el 74LS194 que se muestra en la Figura 22.47. Este registro de cuatro bits puede mover los datos a la izquierda o a la derecha. Además, es posible seleccionar las entradas para que trabajen en modo serie o paralelo, siendo su salida exclusivamente en paralelo.

Este integrado dispone de dos líneas de control S_0 y S_1 con las que se seleccionan los distintos modos de funcionamiento (Tabla 22.2). Además se le han añadido dos líneas de entrada serie diferenciadas, dependiendo si queremos mover los datos con entrada serie hacia la derecha *SRI* (*Serial Right Input*), o hacia la izquierda *SLI* (*Serial Left Input*). Para borrar los datos se le aplica un «0» lógico a la línea de selección *CLR*.

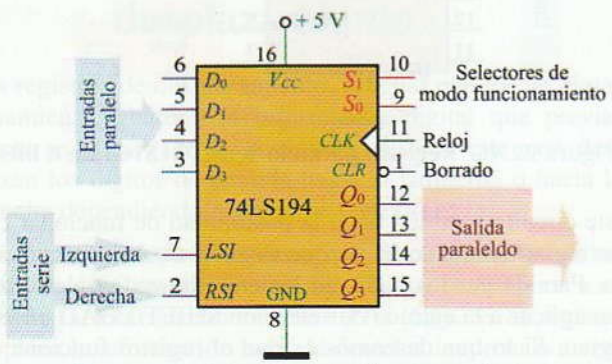


Figura 22.47. Registro de desplazamiento universal 74LS194 de cuatro bits.

Tabla 22.2. Funcionamiento del registro universal 74LS194.

S_0	S_1	Entrada	Modo de trabajo
0	1	*SRI*	Mueve los datos en modo serie/paralelo hacia la derecha.
1	0	*SLI*	Mueve los datos en modo serie/paralelo hacia la izquierda.
1	1	$D_0 \cdots D_3$	Se cargan los datos de las entradas paralelo en las salidas (paralelo/paralelo).
0	0		No se produce nigún cambio.

Actividad propuesta 22.3

Consulta las hojas de características del circuito integrado 74LS194 y analiza sus características más relevantes.

*** En www.paraninfo.es se incluye las hojas de características de este integrado.*

22.8 Contadores

Un contador digital es un circuito secuencial constituido por biestables que es capaz de contar los pulsos de una señal de reloj y expresar el resultado en su salida en un determinado código binario. Este dispositivo digital tiene múltiples aplicaciones, como por ejemplo la división de frecuencias, secuenciación de operaciones, construcción de relojes digitales, etc.

Cuantas más salidas tenga un contador, mayor será la capacidad que posea para contar pulsos. Además se construyen contadores con diferentes códigos binarios de salida, como por ejemplo el natural o el BCD, pudiendo realizar el cómputo en sentido ascendente o descendente.

Dependiendo de cómo se activen con la señal de reloj el conjunto de biestables que constituye un contador, éstos podrán ser asíncronos (los biestables se activan en cascada, uno detrás de otro) o asíncronos (todos los biestables se activan a la vez).

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

22.8.1. Contadores asíncronos

En la Figura 22.48 se muestra un contador asíncrono ascendente compuesto de tres biestables tipo *T*, activados por flanco de bajada, con sus señales de reloj conectadas en cascada.

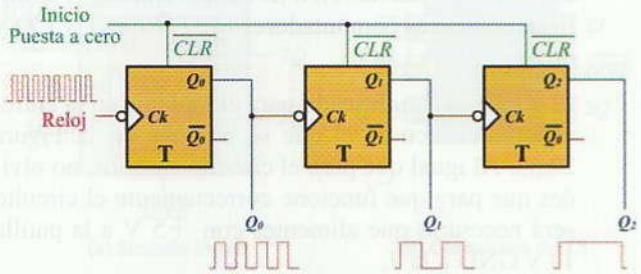


Figura 22.48. Contador asíncrono ascendente de tres bits.

Su funcionamiento es muy sencillo, cada vez que se produce un flanco de bajada en la señal del reloj, se van activando de forma consecutiva uno tras otro los diferentes biestables. Esto es consecuencia de que la salida del primer biestable está conectada con la entrada de reloj del segundo biestable, y así consecutivamente.

En la Figura 22.49 se muestra el cronograma de este contador y en el que se puede observar los 8 estados posibles, de 000 a 111 y su correspondencia en el sistema decimal.

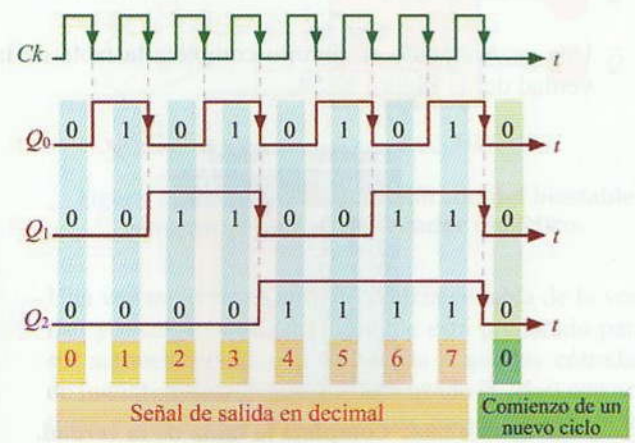


Figura 22.49. Cronograma de un contador asíncrono ascendente de 3 bits.

Observa cómo el período de la señal de la primera salida se ve multiplicado por dos respecto al del reloj, la de la segunda señal por cuatro y la de la tercera por ocho. De lo que se concluye que la frecuencia de cada una de las señales de salida lo hace de forma inversa. Es decir, la frecuencia de la primera señal de salida será la mitad de la del reloj, la de la segunda señal será la cuarta parte y la de la tercera la octava parte. De aquí que, los contadores puedan utilizarse como divisores de frecuencia.

Actividad resuelta 22.3

¿Qué frecuencia resultaría en la cuarta salida de un contador asíncrono, si se le inyecta una señal de reloj de 1.000 Hz?

Solución:

$$F_{\text{salida}} = \frac{F_{\text{reloj}}}{2^n} = \frac{1.000}{2^4} = 62{,}5 \text{ Hz}$$

Los contadores asíncronos presentan el inconveniente de ser lentos, ya que cada uno de los biestables bascula uno detrás de otro, por lo se van acumulando un cierto tiempo de propagación de la señal.

22.8.2. Contadores síncronos

En los contadores síncronos, la señal de reloj se aplica de forma simultánea a todos los biestables del contador, por lo que los mismos basculan al mismo tiempo y eliminan el problema del retraso de la propagación de la señal.

En la Figura 22.50 se muestra un contador síncrono de tres bits compuesto por tres biestables *J-K* activados por flanco de subida. El primer biestable, correspondiente al bit de salida de menor peso, se conecta para que tenga de forma permanente en su entrada J_0 un «1». Observa cómo la salida del primer biestable Q_0 se conecta directamente a la entrada J_1 del segundo biestable, de esta forma sólo se activará el segundo biestable cuando la salida del primero esté a «1». De la misma forma, para que bascule el tercer biestable, tendrán que estar a «1», tanto la salida Q_0 del primer biestable como la Q_1 del segundo. Esto es debido a la interconexión de dichas salidas a través de una puerta AND.

De aquí se concluye que, para que bascule un biestable, debe ser condición indispensable que los anteriores estén a «1» y que el pulso de reloj sea descendente, consiguiendo así que el circuito realice las operaciones de contar. El cronograma resultante resulta ser el mismo que el del contador asíncrono de la Figura 22.49.

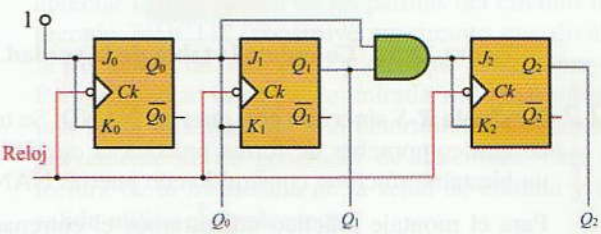


Figura 22.50. Contador síncrono ascendente de tres bits.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

22.1 Biestable *R-S* asíncrono con puertas NOR. Se trata de que compruebes de forma práctica el circuito de un biestable asíncrono construido con puertas NOR.

Para el montaje práctico utilizaremos el entrenador didáctico, y será necesario un circuito integrado 74HCT02 (4 puertas NOR de dos entradas), la utilización de dos conmutadores (*SET* y *RESET*) y de dos diodos LED.

El esquema simplificado para el montaje en el entrenador didáctico es el que se propone en la Figura 22.51. No olvides que para que funcione correctamente el circuito será necesario que alimentes con +5 V a la patilla 14 y GND a la 7.

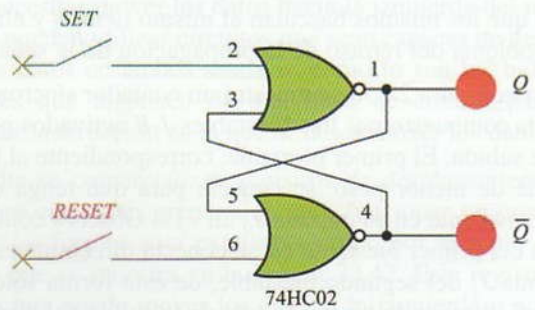


Figura 22.51. Esquema simplificado del biestable asíncrono *R-S* en el entrenador didáctico.

Una vez montado el circuito completa la tabla de la verdad del la Figura 22.52.

R	*S*	*Q*	$\overline{Q}$
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		

Figura 22.52. Completa la tabla de la verdad.

22.2 Biestable *R-S* síncrono con puertas NAND. Se trata de que compruebes de forma práctica el circuito de un biestable síncrono construido con puertas NAND.

Para el montaje práctico utilizaremos el entrenador didáctico, y será necesario un circuito integrado 74HCT00 (4 puertas NAND de dos entradas), la utilización de tres conmutadores (*SET*, *RESET* y *Ck*) y de dos diodos LED.

El esquema simplificado para el montaje en el entrenador didáctico es el que se propone en la Figura 22.53. Al igual que para el circuito anterior, no olvides que para que funcione correctamente el circuito será necesario que alimentes con +5 V a la patilla 14 y GND a la 7.

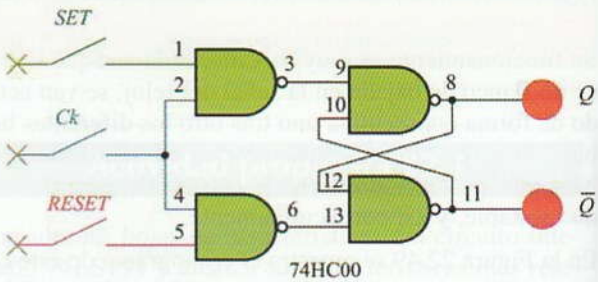


Figura 22.53. Esquema simplificado del biestable síncrono *R-S* en el entrenador didáctico.

Una vez montado el circuito completa la tabla de la verdad del la Figura 22.54.

Entradas			Salidas	
Ck	*R*	*S*	*Q*	$\overline{Q}$
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

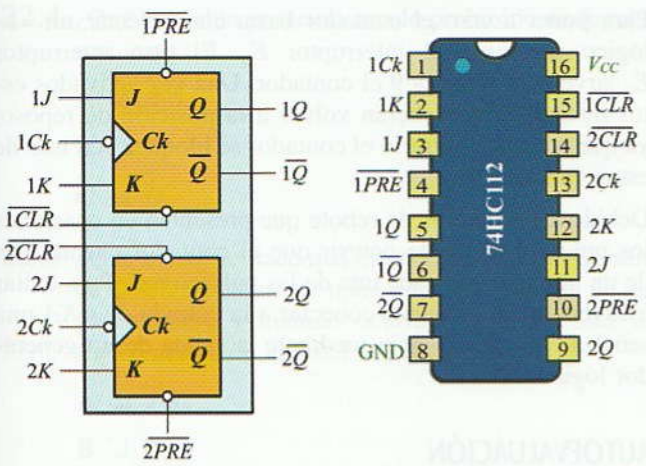
Figura 22.54. Completa la tabla de la verdad.

22.3 Biestable integrado *J-K*. Se trata de que compruebes de forma práctica el circuito de un biestable integrado *J-K*.

Para el montaje práctico utilizaremos el entrenador didáctico, y será necesario un circuito integrado 74HC112 (2 biestables *J-K* activados por flanco de bajada) (Figura 22.55), la utilización de cinco conmutadores (*J*, *K*, *Ck*, *Preset* y *Clear*) y de dos diodos LED.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO



(a) Símbolo lógico (b) Conexiones del CI

Figura 22.55. Doble biestable *J-K* 74HC112.

El esquema simplificado para el montaje en el entrenador didáctico es el que se propone en la Figura 22.56. No olvides que para que funcione correctamente el circuito será necesario que alimentes con +5 V a la patilla 16 y GND a la 8.

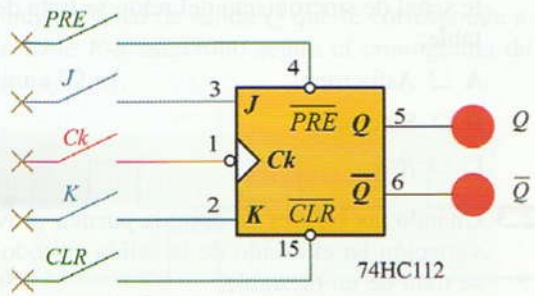


Figura 22.56. Esquema simplificado del biestable síncrono *R-S* en el entrenador didáctico.

Una vez montado el circuito realiza su tabla de la verdad y recuerda que este biestable está preparado para ser activado por flanco de bajada y que las entradas de inicialización (*Preset*) y de borrado (*Clear*) son activas a nivel bajo. Para apreciar mejor el efecto de basculación (*Toggling*) que se produce en la salida cuando las dos señales de entrada *J* y *K* están a «1», sustituye el conmutador *Ck* por una señal de reloj proviniente de un generador de funciones.

22.4 Divisor de frecuencia. Si hacemos trabajar a un biestable síncrono *J-K* en modo *T*, e introducimos por la entrada de reloj *Ck* una señal de sincronismo con un generador de frecuencias, se obtiene a la salida una señal cuadrada con la mitad de la frecuencia. Si utilizamos uno de los biestables *J-K* del integrado 74HC112 activado por flanco de bajada conseguiremos dividir la frecuencia de la señal de entrada a la mitad (Figura 22.57).

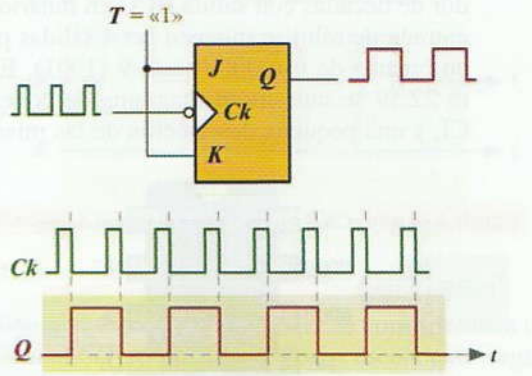


Figura 22.57. Divisor de frecuencia de reloj por 2.

Ahora bien, si conectamos la salida de uno de los biestables a la entrada de reloj de otro, la frecuencia se vuelve a dividir por 2, obteniéndose una división de frecuencia de 4 veces (Figura 22.58).

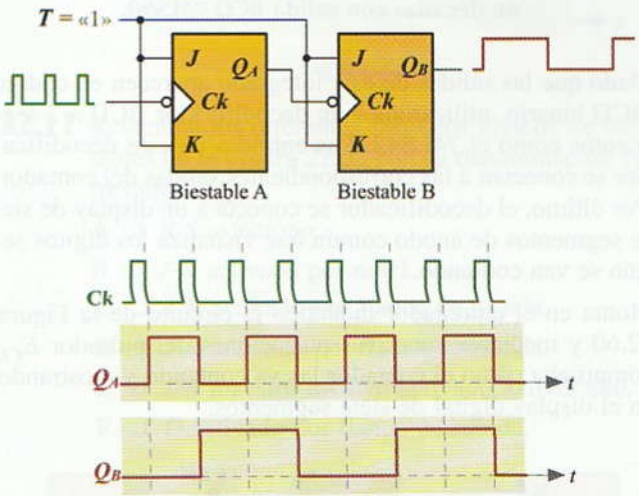


Figura 22.58. Divisor de frecuencia de reloj por 4.

Con la ayuda de la Figura 22.55, donde se puede apreciar la disposición de las patillas del circuito integrado 74HC112, construye un circuito que divida la frecuencia de reloj por 2 y otro que lo haga por 4. Para alimentar la señal de entrada del reloj utiliza una señal cuadrada de una determinada frecuencia proveniente de un generador de funciones. Para la lectura de la frecuencia de la señal de entrada y de salida utiliza el osciloscopio.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

22.5 Contador de décadas. Comprueba el funcionamiento de un contador comercial y, en combinación de un decodificador BCD a 7 segmentos, visualiza el cómputo de este contador. Para ello vamos a utilizar el circuito integrado 74LS90, que es un contador de décadas con salida BCD en binario, con cada entrada de reloj se mueven las 4 salidas para contar en binario de 0 (0000) hasta 9 (1001). En la Figura 22.59 se muestra el diagrama de conexiones del CI, y una pequeña descripción de las mismas.

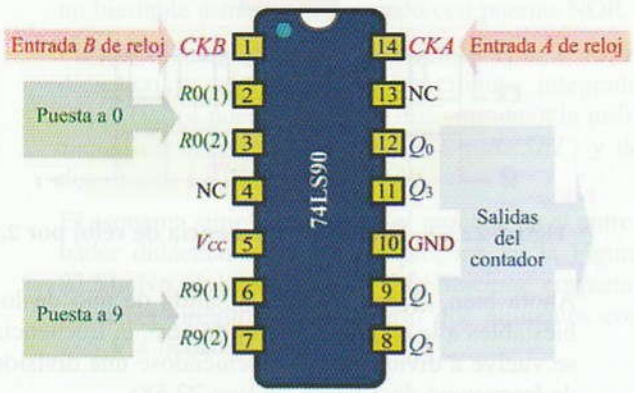


Figura 22.59. Diagrama de conexiones del contador de décadas con salida BCD 74LS90.

Dado que las salidas de este integrado aparecen en código BCD binario, utilizaremos un decodificador BCD a 7 segmentos como el 74LS47. Las entradas de este decodificador se conectan a las correspondientes salidas del contador. Por último, el decodificador se conecta a un display de siete segmentos de ánodo común que visualiza los dígitos según se van contando.

Monta en el entrenador didáctico el circuito de la Figura 22.60 y mediante sucesivas pulsaciones del pulsador E_{CK} comprueba cómo el contador las va contando y mostrando en el display digital de siete segmentos.

Para poner a cero el contador basta con inyectar un «1» lógico mediante el interruptor E_0. El otro interruptor E_9 sirve para poner a 9 el contador. Una vez activados estos interruptores, deberán volver a la posición de reposo, ya que en caso contrario el contador se bloquea con uno de estos valores.

Debido a los efectos de rebote que presentan en ocasiones los pulsadores, puede ocurrir que el contador cuente más de un impulso con cada una de las pulsaciones. Para evitar este fenómeno se puede conectar a la entrada de *CKA* una señal de baja frecuencia mediante la salida de un generador lógico.

AUTOEVALUACIÓN

22.1 Los sistemas secuenciales se caracterizan porque:

A ❑ Sus salidas sólo dependen del valor que adquieran sus entradas.

B ❑ Poseen realimentación y memoria.

C ❑ Las salidas permanecen constantes.

22.2 Cuando las señales de entrada sólo pueden provocar una variación en el estado de la salida si hay presente señal de sincronismo del reloj, se trata de un biestable:

A ❑ Asíncrono.

B ❑ Síncrono.

C ❑ *R-S*.

22.3 Cuando las señales de entrada pueden provocar una variación en el estado de la salida en todo instante, se trata de un biestable.

A ❑ Asíncrono.

B ❑ Síncrono.

C ❑ *J-K*.

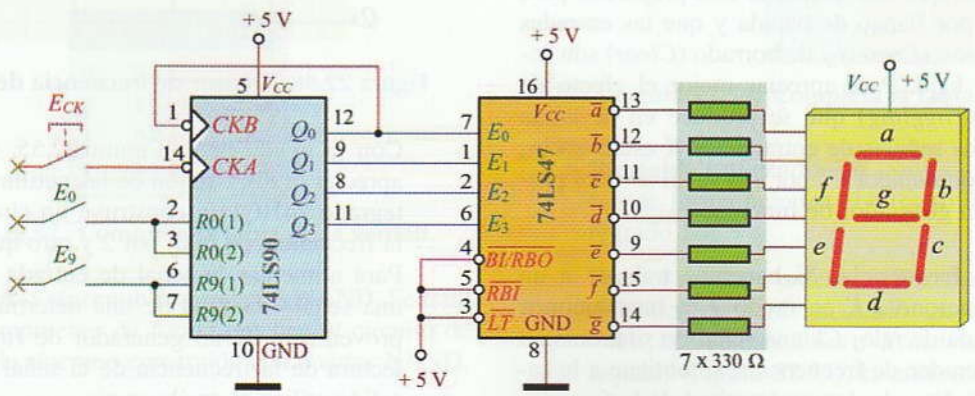


Figura 22.60. Esquema del contador de décadas para su montaje en el entrenador didáctico.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

22.4 ¿Qué biestable posee un estado prohibido de funcionamiento?

A ❑ *R-S*.

B ❑ *T*.

C ❑ *D*.

22.5 ¿Qué biestable hace que el nivel de la señal de salida *Q* sea exactamente igual a la de la entrada de datos, siempre y cuando ocurra mientras exista un flanco activo de la señal de reloj?

A ❑ *J-K*.

B ❑ *T*.

C ❑ *D*.

22.6 La entrada asíncrona *Preset* pone la salida de un biestable síncrono en:

A ❑ 1.

B ❑ 0.

C ❑ Basculación.

22.7 Dibuja la señal de salida *Q* que le corresponde a un biestable *R-S* asíncrono según el cronograma de la Figura 22.61.

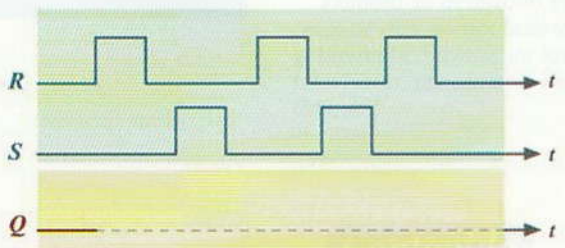


Figura 22.61.

22.8 Dibuja la señal de salida *Q* que le corresponde a un biestable *J-K* síncrono activado por nivel según el cronograma de la Figura 22.62.

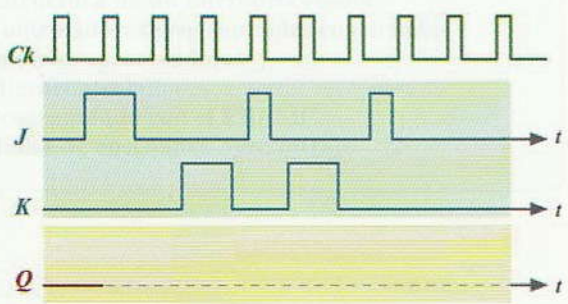


Figura 22.62.

22.9 Dibuja la señal de salida *Q* que le corresponde a un biestable *J-K* síncrono activado por flanco descendente según el cronograma de la Figura 22.63.

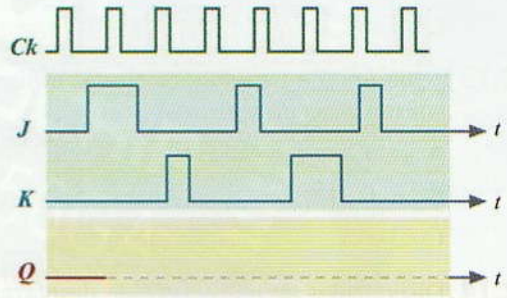


Figura 22.63.

22.10 Dibuja la señal de salida *Q* que le corresponde a un biestable *D* activado por flanco ascendente según el cronograma de la Figura 22.64.

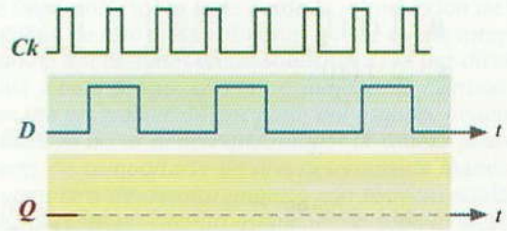


Figura 22.64.

22.11 Relaciona los diferentes símbolos lógicos de biestables de la Figura 22.65 con su denominación correspondiente.

A ❑ *R-S* asíncrono.

B ❑ *J-K* activado por nivel.

C ❑ *J-K* activado por flanco de bajada.

D ❑ *J-K* activado por flanco de subida.

E ❑ *J-K* maestro-esclavo activado a nivel alto.

F ❑ *D* activado por flanco de subida.

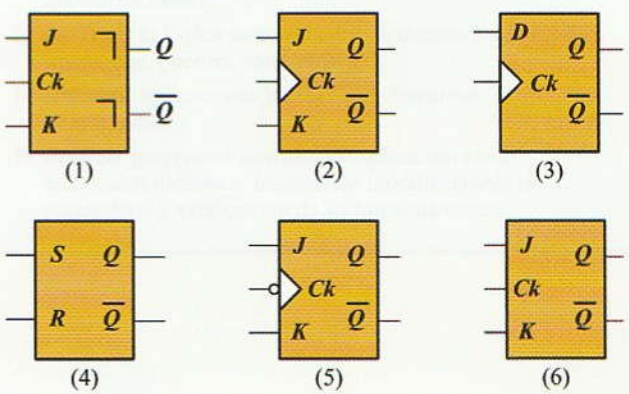


Figura 22.65.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

22.12 ¿Cuántos biestables necesita un registro de 4 bits?

A ❑ 8.

B ❑ 12.

C ❑ 4.

22.13 ¿Qué tipo de biestable es el más utilizado para la construcción de registros?

A ❑ *T*.

B ❑ *D*.

C ❑ *J-K*.

22.14 Disponemos de un registro de desplazamiento hacia la derecha de entrada serie y salida paralelo. Suponiendo que su estado inicial es 0000, ¿qué señal aparecerá en la salida si mantenemos la entrada con un nivel lógico «1» durante 3 pulsos?

A ❑ 1000.

B ❑ 0011.

C ❑ 1110.

22.15 En un contador asíncrono:

A ❑ Todos los biestables se activan a la vez con la señal de reloj.

B ❑ Los biestables se activan en cascada con la señal de reloj.

C ❑ Poseen un reloj interno para la activación de los biestables.

22.16 En un contador síncrono:

A ❑ Todos los biestables se activan a la vez con la señal de reloj.

B ❑ Los biestables se activan en cascada con la señal de reloj.

C ❑ Poseen un reloj interno para la activación de los biestables.

22.17 ¿Qué frecuencia resultaría en la tercera salida de un contador síncrono, si se le inyecta una señal de reloj de 800 Hz?

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Circuitos microprogramables

El avance de la electrónica digital parece imparable, sobre todo desde la introducción de los circuitos microprogramables. La principal ventaja de estos dispositivos es que se puede integrar prácticamente todos los circuitos de multitud de aplicaciones en un solo chip. Una vez diseñados, estos chips se fabrican de forma masiva y bajo precio, con la posibilidad de cambiar su funcionalidad dependiendo de una determinada programación por parte del usuario. Imagínate lo fácil que parece, los técnicos electrónicos ya no se tienen que romper la cabeza proyectando complicados circuitos que sean capaces de comportarse de una determinada manera y que, posteriormente, haya que montar en una placa de circuito impreso con técnicas analógicas o digitales, sino que ahora podemos disponer de un circuito estándar con toda la electrónica montada de fábrica (hardware) y que no sabe hacer nada hasta que se lo enseñamos con un programa (software).

Primero se desarrolló el microprocesador, que en la actualidad es la unidad central de proceso de los computadores modernos, y posteriormente apareció el microcontrolador que gobierna la mayoría de los dispositivos electrónicos. Se pueden encontrar en los teléfonos, los televisores, las cámaras de fotos, los electrodomésticos, los sistemas de automatización industrial, etc.

Contenido

23.1. **Introducción**
23.2. **Controlador, microprocesador y microcontrolador**
23.3. **Un poco de historia**
23.4. **Estructura de un microprocesador**
23.5. **Controladores programables construidos con microprocesadores**
23.6. **Microcontroladores**
23.7. **Programando con el PBASIC**
Actividades de enseñanza aprendizaje

Objetivos

- Identificar la estructura de un microprocesador y microcontrolador.
- Describir la lógica asociada a los elementos programables (memorias, puertos, entre otros).
- Describir aplicaciones básicas con elementos programables.
- Realizar programas sencillos de aplicación en el entrenador didáctico, incluyendo modificaciones de parámetros y verificación de su funcionamiento.

WWW.AUTODIDACTA.INFO

23.1 Introducción

Con lo estudiado hasta ahora, para conseguir una determinada aplicación mediante circuitos digitales, nos veíamos obligados a realizar diseños que combinan circuitos lógicos secuenciales con combinacionales, dando lugar a circuitos complejos que utilizan muchos componentes y que, una vez montados, sólo sirven para esa aplicación concreta. Esta forma de trabajar, conocida como **lógica cableada**, da lugar a dispositivos muy caros, con muchos ajustes y fallos.

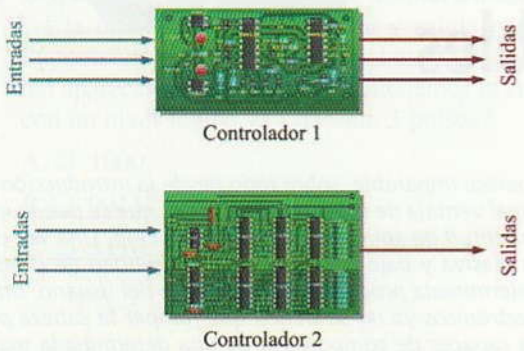


Figura 23.1. La lógica cableada obliga a construir un circuito diferente por cada controlador.

Ahora imagínate que se pudiese fabricar un dispositivo electrónico en un solo chip, que mediante una adecuada programación externa pudiera servir para múltiples aplicaciones. Es decir, que con un solo componente, pudiésemos construir multitud de circuitos sin tener que cambiar sus conexiones internas. Como habrás imaginado, estos dispositivos ya existen, nos referimos a los circuitos microprogramables, como es el caso de los microprocesadores y los microcontroladores, que también se les conoce por el nombre de **lógica programada**.

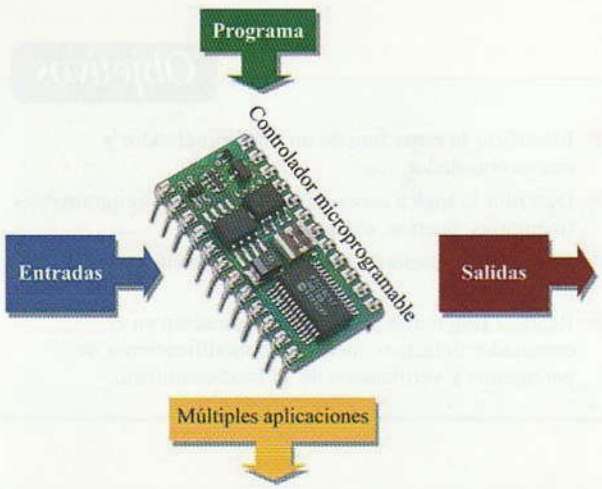


Figura 23.2. Un mismo circuito microprogramable puede utilizarse para el control de diferentes aplicaciones cambiando la programación y la conexión de las entradas y salidas.

Esta revolución tecnológica comenzó en el año 1971 con la aparición del primer microprocesador fabricado en un solo circuito integrado, que consiguió reducir el tamaño de los circuitos electrónicos y simplifico enormemente su diseño.

23.2 Controlador, microprocesador y microcontrolador

Un controlador es un dispositivo que sirve para la automatización de uno o varios procesos. Así, por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de una alarma dispone de varios sensores que controlan diferentes puntos de intrusión, cuando se activa alguno de estos puntos, el controlador genera las señales adecuadas para activar las alarmas y enviar una alerta al responsable de seguridad.

Hasta los años setenta los controladores se realizaban únicamente con lógica cableada, después se utilizaron los microprocesadores en combinación con circuitos integrados de memoria y de unidades de entrada/salida montados sobre un circuito impreso. El microprocesador dio lugar al gran invento del siglo XX, el ordenador personal.

El gran avance de las nuevas tecnologías de integración ha conseguido que todos los circuitos que necesita un controlador programable se puedan incluir en un solo chip, dando lugar al nacimiento del microcontrolador.

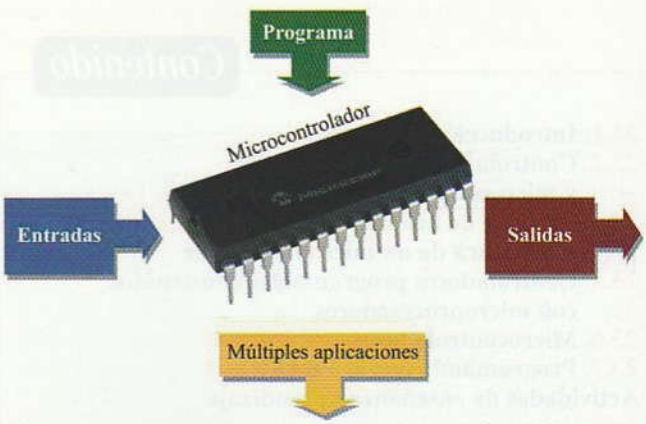


Figura 23.3. Microcontrolador fabricado en un solo chip.

Se podría decir que un microcontrolador es en sí mismo un pequeño ordenador con una capacidad de proceso limitada pero que se fabrica en un solo chip.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Hoy en día los microcontroladores se utilizan para casi todo. Además de las aplicaciones típicas dentro de la automatización industrial y la robótica, se encuentran en cualquier dispositivo electrónico de consumo, como puede ser el teléfono móvil, la cámara de fotos, el ratón del ordenador, el teclado, la impresora, el escáner, el MP3, el DVD, el televisor, el receptor de TDT, la lavadora, el microondas, etc.

Figura 23.4. El microcontrolador se encuentra gestionando todo tipo de aparatos de electrónica de consumo.

23.3 Un poco de historia

El ENIAC fue el primer computador digital que se construyó en 1940. Como todavía no se había inventado el transistor, se fabricó con válvulas, por lo que su peso y volumen eran enormes, entorno a 30 toneladas.

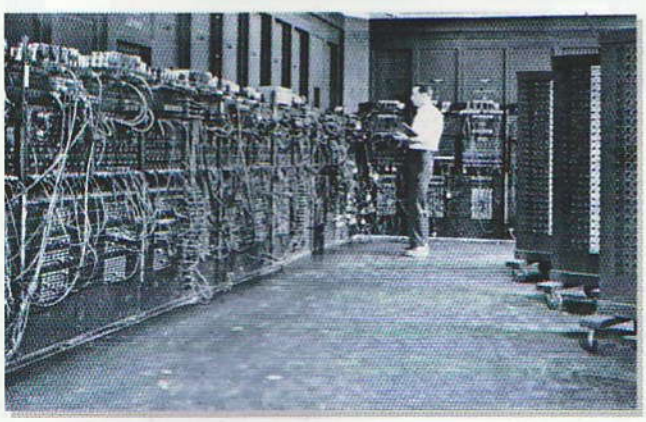


Figura 23.5. El ENIAC. Primer computador digital construido con válvulas.

En 1948 se descubre el transistor construido a base de semiconductores, que consigue reducir enormemente las dimensiones y el consumo eléctrico de las computadoras. En 1959 se comienzan a construir los primeros circuitos integrados, lo que reduce todavía aun más el tamaño de estos dispositivos. Estos primeros ingenios informáticos sólo eran capaces de realizar operaciones muy simples, y si además se deseaba que hiciesen cómputos diferentes, se hacía necesario cambiar sustancialmente las conexiones de los circuitos (el hardware).

En 1971 la empresa Intel fabrica el primer microprocesador integrado, el 4004. Era bastante limitado, ya que sólo era capaz de sumar y restar, y únicamente lo podía hacer con 4 bits a la vez. Su primera aplicación fue la construcción de calculadoras portátiles. Este microprocesador estaba formado por 2.300 transistores y era capaz de realizar unas 100.000 operaciones por segundo (100 kHz), nada comparable a las velocidades que se alcanzan hoy en día.

Figura 23.6. Intel 4004. Primer microprocesador de la historia.

Desde la aparición del primer microprocesador, han ido apareciendo en el mercado diferentes modelos fabricados por distintas empresas que han ido aumentando la capaci-

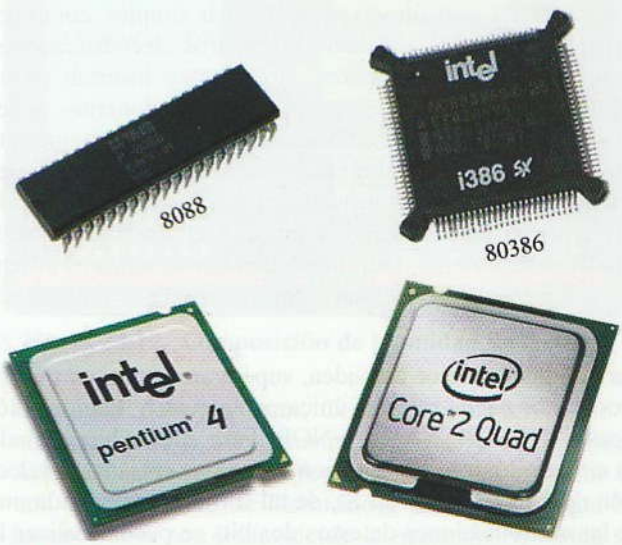


Figura 23.7. Aspecto de diferentes microprocesadores.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

dad y velocidad de procesamiento de datos, y todo ello fabricado en una superficie similar a la de un sello postal. La carrera parece imparable. En la Tabla 23.1 se muestra, a modo de ejemplo, algunos de los microprocesadores fabricados por la empresa Intel a lo largo de estos últimos años.

Tabla 23.1. Algunos de los microprocesadores de la empresa Intel.

Año	Modelo	Ancho de bus	Frecuencia
1971	4004	4 bits	100 kHz
1979	8088	8 bits	14 MHz
1982	80286	16 bits	12,5 MHz
1985	80386	32 bits	20 MHz
1989	Pentium	32 bits	25 MHz
1993	Pentium pro	64 bits	60 MHz
1995	Pentium II	64 bits	200 MHz
1997	Pentium III	64 bits	266 MHz
1999	Pentium III	64 bits	550 MHz
2001	Pentium 4	64 bits	2 GHz
2007	Intel Core 2	64 bits	3,33 GHz
2008	Intel Core 2 Quad	64 bits	3,2 GHz

23.4 Estructura de un microprocesador

Un microprocesador es un circuito de alta escala de integración (LSI), constituido por otros más simples, como por ejemplo, biestables, contadores, registros, decodificadores, comparadores, convertidores, etc., que se insertan en un solo circuito integrado. A todos estos componentes se les conoce por el hardware del microprocesador. Para que este dispositivo pueda llevar a cabo diferentes funciones sin tener que modificar su hardware, su diseñador ha preparado una lista de instrucciones a las que el microprocesador obedece ciegamente. Este juego de instrucciones es el lenguaje con el que nos comunicamos con él y se conoce como software.

Para entender mejor esta idea, supongamos que un microprocesador puede realizar únicamente cuatro funciones lógicas: AND, OR, NAND y NOR. Para ello se ha diseñado un circuito lógico combinacional con una entrada de selección de 2 bits (Figura 23.8), de tal forma que por cada una de las combinaciones de estos dos bits se pueda realizar la función lógica deseada (Tabla 23.2).

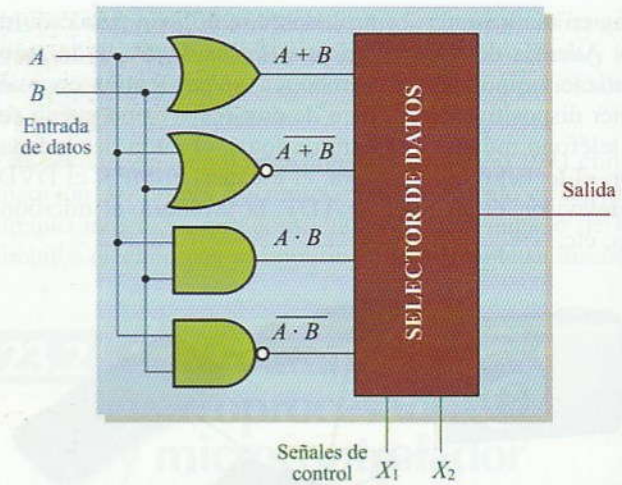


Figura 23.8. Ejemplo del circuito de un microprocesador simple (el hardware).

Tabla 23.2. Función y su instrucción (el software).

Función	Instrucción
AND	00
OR	01
NAND	10
NOR	11

Los microprocesadores de hoy en día son capaces de hacer múltiples aplicaciones a una velocidad de vértigo, para lo que necesitan para su diseño de millones de transistores y un amplio juego de instrucciones.

La función del microprocesador es la de procesar información. Ejecuta instrucciones almacenadas como números binarios organizados secuencialmente en la memoria principal.

Figura 23.9. Funciones del microprocesador.

Dado que esta información fluye en grandes cantidades, el sistema de control basado en un microprocesador requiere del uso de una o varias memorias que almacenan dicha información de modo temporal. A modo de ejemplo, en la Figura 23.10 se muestra el diagrama de bloques básico de un ordenador personal que tiene como unidad central de proceso (CPU) a un microprocesador.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

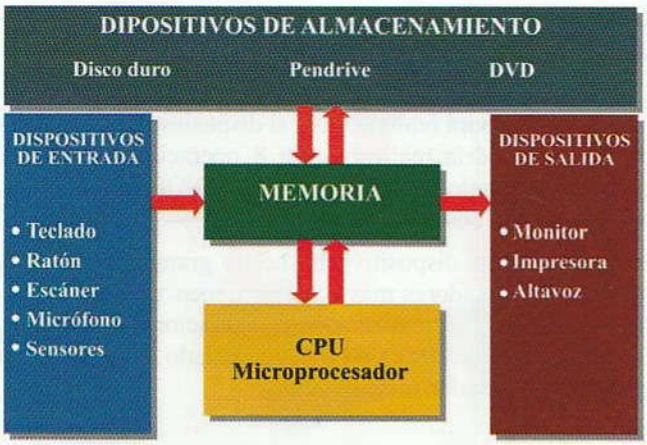


Figura 23.10. **Diagrama de bloques de un ordenador personal.**

En la Figura 23.11 podemos ver la estructura básica de un microprocesador, con sus bloques fundamentales. En la práctica, los microprocesadores reales son mucho más complejos, pero esta aproximación nos ayudará a conocer sus componentes básicos así como su función.

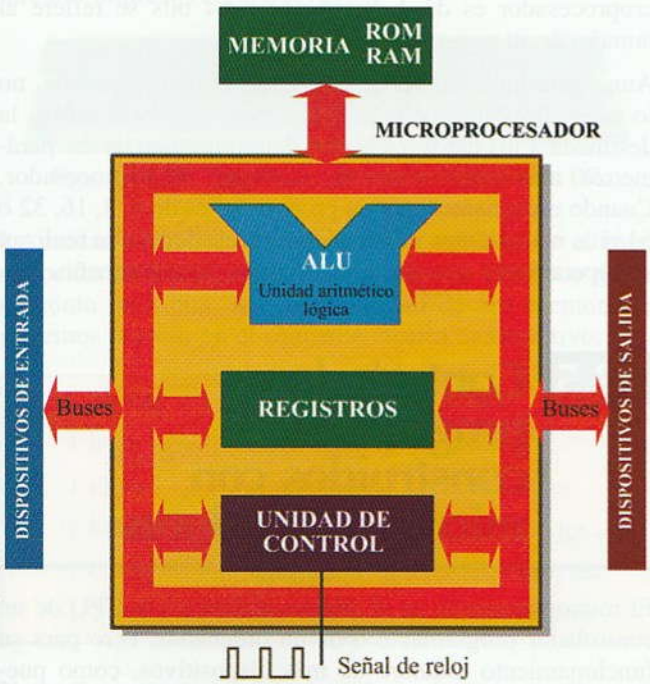


Figura 23.11. **Estructura básica de un procesador.**

Un microprocesador está formado básicamente por:

- **Una unidad aritmético-lógica (ALU)** que se encarga de realizar los cálculos y comparaciones y toma decisiones lógicas.
- **Registros** donde se almacena información temporalmente (memoria local).
- **Unidad de control** que interpreta y ejecuta las instrucciones.
- **Buses** que constituyen las conexiones internas y externas del microprocesador para que éste se pueda comunicar con los dispositivos de entrada y de salida, como por ejemplo, el teclado, el USB, el disco duro, el monitor, la impresora, etc.
- **Reloj.** Se construye con un oscilador de cristal y proporciona la señal de sincronización que hace que todas las actividades del microprocesador se coordinen. La velocidad de reloj ha ido aumentando con cada nuevo microprocesador y nos permite ejecutar miles de millones de instrucciones por segundo (GHz).

23.4.1. Unidad de control

Es la parte central del microprocesador y no hay nada que se escape de su control. Su misión es controlar y ejecutar todas las operaciones, como por ejemplo:

- Recoge las instrucciones de memoria.
- Decodifica o interpreta las instrucciones.
- Ejecuta las instrucciones que tengan que ver con el propio microprocesador y con las unidades de entrada y salida (periféricos).

En la Figura 23.12 se muestran los dispositivos de que consta la unidad de control para realizar su función.

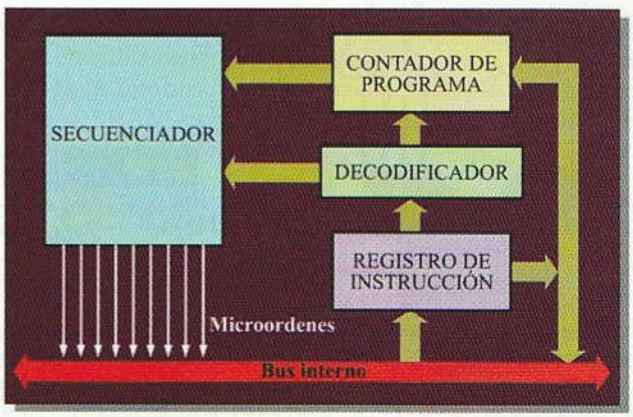


Figura 23.12. **Composición de la unidad de control.**

- **Contador de programa.** Contiene la dirección de la memoria de la siguiente instrucción que se va a ejecutar. Además, incrementa de forma automática su valor en uno en cada ciclo de instrucción, de tal forma que las instrucciones son leídas desde la memoria en forma secuencial.

© Ediciones Paraninfo

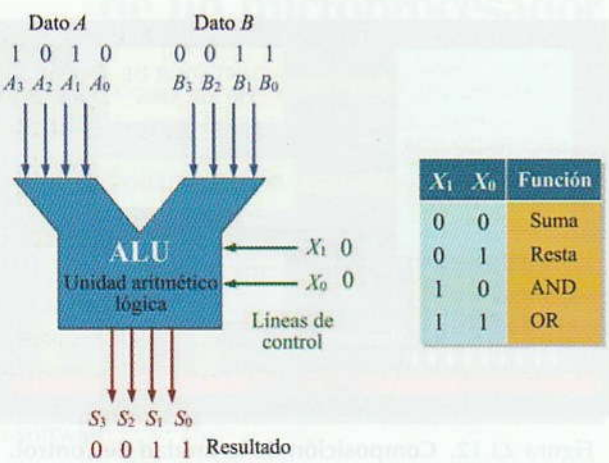
WWW.AUTODIDACTA.INFO

- **Registro de instrucción.** Memoriza la instrucción que se está ejecutando en cada momento a la espera de ser decodificada, preparada y al final ejecutada.
- **Decodificador.** Toma el código de operación de la instrucción en curso del registro de instrucción, lo analiza y en función de éste, envía las órdenes necesarias al resto de dispositivos para su ejecución a través del secuenciador.
- **Secuenciador.** Produce las órdenes que, sincronizadas por los impulsos de reloj del sistema, consiguen que se vaya ejecutando paso a paso la instrucción que se encuentra en el registro de instrucción.

23.4.2. Unidad aritmético-lógica (ALU)

La ALU está formada por circuitos combinacionales y realiza las operaciones elementales de tipo aritmético (sumas, restas, productos, divisiones) y de tipo lógico (comparaciones). La unidad de control le envía los datos a la ALU a través del bus interno y le indica qué operación realizar en cada momento. Una vez realizada la operación, la ALU deposita el resultado en un registro llamado **acumulador**.

En la Figura 23.13 se muestra, como ejemplo, cómo podría ser la configuración de una ALU que fuese capaz de realizar las operaciones de suma, resta, y las funciones lógicas AND y OR, de cuatro bits.



X_1	X_0	Función
0	0	Suma
0	1	Resta
1	0	AND
1	1	OR

Figura 23.13. Ejemplo de una ALU de cuatro bits.

Dependiendo de los bits de control X_0 y X_1 activados se puede seleccionar la función a realizar por la ALU. En el ejemplo de la Figura 23.13, se han activado los bits 00 de control, que se corresponden con la función de suma. Dado que los números de entrada eran 1010 y 0011, en la salida se obtiene su suma, es decir, un resultado de 1101 que queda cargado en el acumulador.

Contra más líneas de control posea una ALU más funciones distintas podrá realizar. Así, si dispusiese de tres líneas de control, podría realizar hasta 8 operaciones distintas, como por ejemplo: AND, OR, NAND, NOR, XOR, NOT, suma binaria y resta binaria.

Hoy en día este dispositivo ha hecho grandes avances, y los microprocesadores más actuales tienen varias ALU especializadas en la realización de operaciones complejas. De hecho, en muchos casos le ha cambiado su nombre por el de «coprocesador matemático».

23.4.3. Registros

La misión de los registros es la de almacenar los resultados de la ejecución de instrucciones, cargar datos desde la memoria externa o almacenarlos en ella. Cuanto mayor sea el número de bits que puede almacenar un registro, mayor será también la capacidad y velocidad de ejecución del microprocesador, de tal forma que cuando se dice que un microprocesador es de 4, 8, 16, 32 o 64 bits se refiere al tamaño de su registros.

Aunque la importancia de los registros parezca trivial, no lo es en absoluto. De hecho, una parte de los registros, la destinada a los datos, es la que determina uno de los parámetros más importantes de cualquier microprocesador. Cuando escuchamos que un procesador es de 4, 8, 16, 32 o 64 bits, nos estamos refiriendo a procesadores que realizan sus operaciones con registros de datos de ese tamaño.

23.5 Controladores programables construidos con microprocesadores

El microprocesador en sí mismo constituye la CPU de un controlador programable o de un ordenador. Pero para su funcionamiento requiere de más dispositivos, como pueden ser la memoria, la unidad de entrada/salida y los buses de datos (Figura 23.14).

23.5.1. Memoria

Dado que el microprocesador no es capaz de alojar la suficiente memoria para almacenar las instrucciones y los datos de programa, se utilizan bloques de memoria que se

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

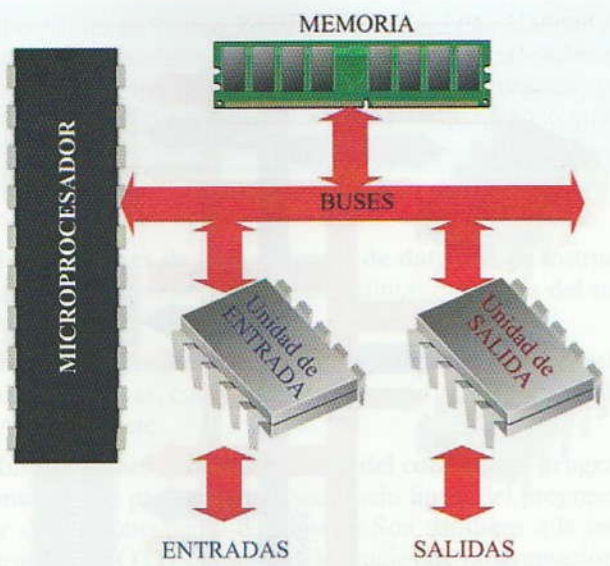


Figura 23.14. Estructura de un controlador programable.

alojan físicamente fuera del mismo. Suele estar compuesta por un solo chip o varios chips montados en una placa de circuito impreso (Figura 23.15).

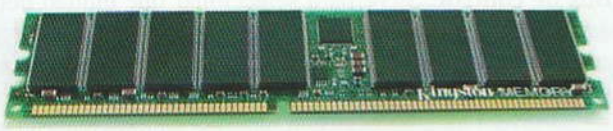


Figura 23.15. Tarjeta de memoria RAM de un PC.

La unidad común de medición de la memoria es el byte, conocido también como octeto porque se compone de un conjunto de 8 bits. Así, la capacidad de una memoria la podemos resumir en el siguiente cuadro comparativo:

1 Nibble	equivale a	4 bits
1 byte	equivale a	8 bits
1 kbyte	equivale a	1.024 bytes
1 Mbyte	equivale a	1.024 kbytes
1 Gbyte	equivale a	1.024 Mbytes
1 Tbyte	equivale a	1.024 Gbytes

Nota: *En realidad, uno debería pensar que el término kbyte, siguiendo el uso del prefijo del sistema internacional de unidades, equivale a 1.000 bytes, pero como estamos trabajando en números binarios, en realidad se refiere a 2^{10} que da como resultado un número exacto igual a 1.024 bytes.*

Para el funcionamiento de un microprocesador se requiere de dos tipos de memoria:

- **Memoria ROM:** Es una memoria de sólo lectura (*Read Only Memory*). Se encarga de almacenar los datos de programa que necesita el microprocesador para funcionar y no deben de borrarse aun cuando se desconecte la alimentación eléctrica del sistema.
- **Memoria RAM**: Es una memoria de acceso aleatorio (*Random Access Memory*). Contiene información que el microprocesador puede leer o escribir según vaya necesitando en la ejecución de las instrucciones de los programas. Es una memoria de almacenamiento temporal y necesita de alimentación eléctrica para mantener sus datos almacenados. Por esta razón al apagar la máquina pierde todo su contenido.

Existen diversos tipos de memoria ROM:

- **ROM:** Permite ser grabada con datos mediante hardware. Una vez que la ROM ha sido grabada, los datos permanecen fijos y no pueden ser modificados.
- **EPROM (Memoria programable y borrable de sólo lectura).** Una vez grabadas existe la posibilidad de borrar su contenido para poder ser grabadas por el usuario. Para hacerlo hay que retirar la cubierta protectora de la parte superior del chip y exponer el material semiconductor a radiación ultravioleta.
- **EEPROM.** Una vez grabadas existe la posibilidad de borrar su contenido para poder ser grabadas por el usuario. Su borrado se efectúa por medio de un circuito electrónico.

Existen diversos tipos de memoria RAM:

- **La RAM estática (SRAM)**, que conserva los datos mientras esté conectada la tensión de alimentación. Se suele utilizar como memoria caché porque funciona a gran velocidad.
- **La RAM dinámica (DRAM)**, a la que hay que alimentar eléctricamente cada cierto tiempo para que se mantenga la información almacenada. Aunque es más lenta que la SRAM su bajo coste económico la hace viable en muchas aplicaciones.

23.5.2. Unidad de entrada/salida. Periféricos

Las unidades de entrada/salida se encargan de transferir la información desde el microprocesador hacía los periféricos de entrada y salida. La gestión de los datos se realiza a través de los buses del sistema con el apoyo de unidades de memoria propia.

En el caso de un ordenador, los periféricos o dispositivos de entrada y de salida podrían ser los que se muestran en la Figura 23.16.

En el caso de un controlador programable de un proceso automatizado los dispositivos de entrada y salida podrían ser los que se muestran en la Figura 23.17.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Figura 23.16. **Periféricos en un ordenador.**

Figura 23.17. **Periféricos en un controlador programable industrial.**

23.5.3. Buses del sistema

Los buses son las líneas de interconexión eléctrica por donde fluye la información en todo el sistema. Estos buses o una parte de ellos quedan reflejados en los terminales del encapsulado del microprocesador. Existen tres tipos de buses (Figura 23.18):

- **Bus de datos:** Manejan los datos del sistema. Su número de líneas tiene que ser igual al número de bits del dato. Este bus interconecta a todas las unidades del sistema y es bidireccional, es decir sirve para leer y escribir información entre las mismas.
- **Bus de direcciones:** Se utiliza para señalar la dirección de la memoria (ROM, RAM, o unidad de E/S) que debe ser leída o escrita.

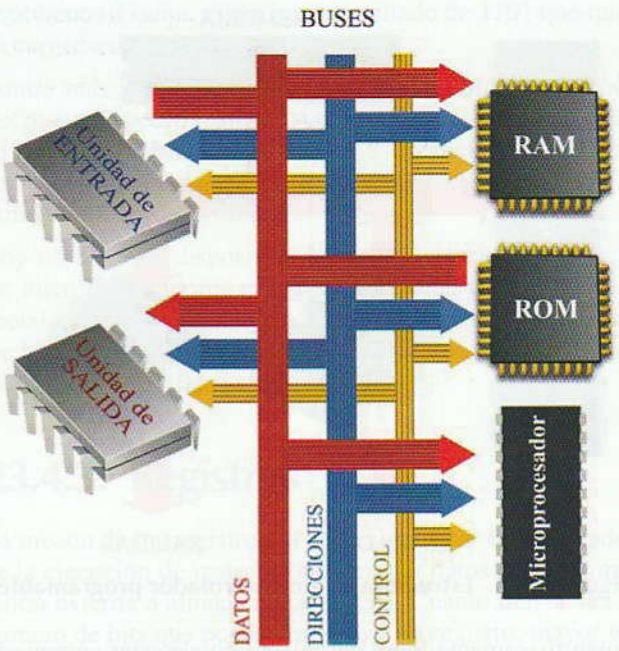


Figura 23.18. **Buses del sistema.**

- **Bus de control:** Sirve para seleccionar qué unidad debe dar o recibir cada dato del microprocesador (lectura/escritura). Además sincroniza de forma precisa la transmisión de datos en el sistema.

23.5.4. Conjunto de instrucciones. Software

Para que un determinado programa pueda ser ejecutado por el microprocesador ha de estar almacenado en la memoria central. Éste irá tomando una a una las instrucciones del programa y las irá ejecutando (Figura 23.19).

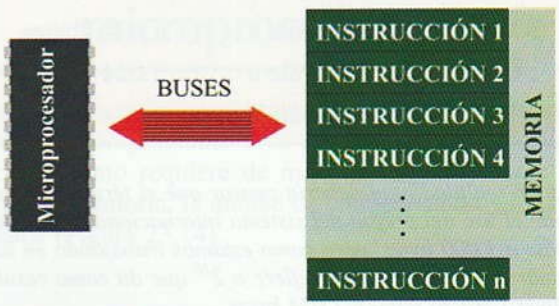


Figura 23.19. **Ejecución de las instrucciones en un microprocesador.**

Dependiendo de lo avanzado que sea el microprocesador, podrá entender y ejecutar más o menos instrucciones.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

El conjunto de instrucciones que es capaz de entender y ejecutar un determinado microprocesador nos da una idea de las operaciones básicas que puede realizar, y que organizadas de forma adecuada, constituyen lo que conocemos como software.

Las instrucciones se clasifican según su función en:

- **Instrucciones de transferencia de datos.** Estas instrucciones mueven datos entre las distintas memorias del sistema.
- **Instrucciones de cálculo.** Realizan operaciones aritméticas y lógicas, como sumar, restar, multiplicar o dividir, AND, OR, etc.
- **Instrucciones de transferencia del control del programa.** Sirven para alterar la secuencia lineal del programa y saltar a otro punto del mismo. Son similares a la instrucción **GOTO** de muchos lenguajes de programación.
- **Instrucciones de control.** Permiten seleccionar diferentes funciones del microprocesador, como por ejemplo, pasar órdenes al coprocesador matemático, detener la actividad del microprocesador hasta que se produzca una determinada acción, etc.

La verdadera inteligencia de un procesador está en el **programador**, que es el que, a través de un programa, indica la secuencia de acciones a realizar. Por esta razón, el programador se las tiene que ingeniar para mover en cada instante los datos precisos, así como realizar las operaciones adecuadas para conseguir el resultado esperado.

El único leguaje que entiende un microprocesador es conocido como **Lenguaje máquina**, en el que las instrucciones se escriben en código binario y está ligado íntimadamente con la arquitectura propia del mismo. Dada la dificultad de programar en este lenguaje, se ha desarrollado lo que se conoce como **Lenguajes de alto nivel**, como el Pascal, C, C++, Java, Visual Basic, que consiguen hacer mucho más fácil e intuitivo la tarea de programar.

Una vez escrito el programa en un lenguaje de alto nivel, se necesita traducir el mismo a lenguaje máquina. Esto lo hace un programa especial llamado **Compilador**. Una vez compilado el programa ya se puede cargar en la memoria del sistema para que sea ejecutado por el microprocesador.

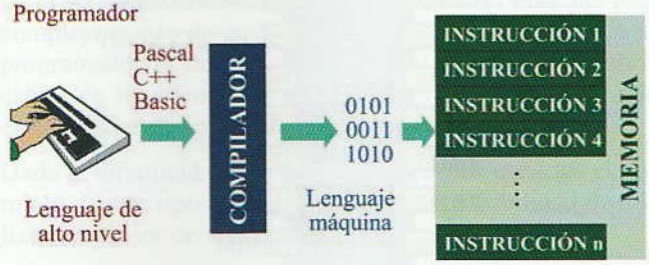


Figura 23.20. El compilador traduce el lenguaje de alto nivel a lenguaje máquina.

23.6 Microcontroladores

Los microprocesadores modernos poseen una capacidad de procesamiento de datos increíble y resultan muy útiles para la construcción de potentes computadoras. Sin embargo, existen multitud de aplicaciones de control en las que no es necesaria tanta velocidad de proceso ni tanta memoria, como por ejemplo, para controlar un electrodoméstico, el ratón o el teclado de un ordenador personal, el teléfono móvil, una alarma, una puerta de garaje, un ascensor, el mando a distancia del televisor, etc.

De aquí nace la idea del **microcontrolador**, que es un dispositivo mucho más económico que un microprocesador, y en un solo chip integra la CPU, la memoria ROM, la RAM, y una interfaz de entrada/salida. Es como un pequeño ordenador metido en un chip.

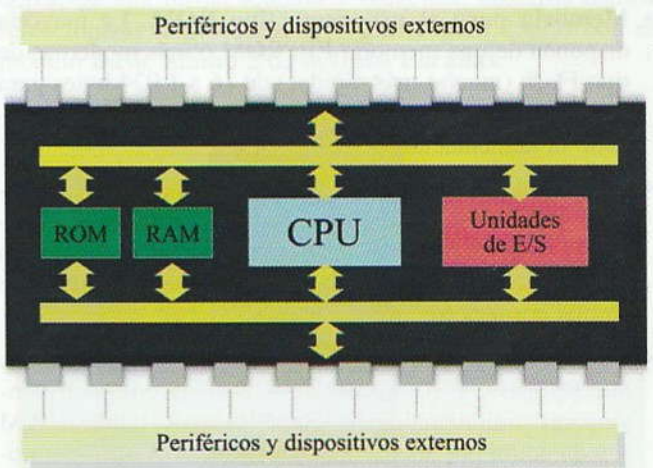


Figura 23.21. Estructura básica de un microcontrolador.

Las áreas de aplicación de los microcontroladores son prácticamente ilimitadas. Cada vez aparecen más dispositivos que son gobernados por un microcontrolador, consiguiendo más prestaciones, reducción del tamaño y precio, y aumento de su fiabilidad.

Una de las características más importantes de los microcontroladores es su flexibilidad, ya que un solo modelo puede ser utilizado para múltiples aplicaciones modificando solamente el programa de instrucciones.

Hoy en día se fabrican, por parte de varias firmas comerciales, muchos tipos de microcontroladores, con diferentes características y prestaciones. La selección de uno u otro

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

para una determinada aplicación vendrá determinada por las necesidades e idoneidad requeridas y que mejor se adapten al fin perseguido.

Así, por ejemplo, se fabrican microcontroladores de 4, 8, 16 o 32 bits. Es evidente que las prestaciones de los microcontroladores de 16 y 32 bits serán superiores a los de 4 y 8 bits. Sin embargo, en la práctica los microcontroladores de 8 bits son de los más utilizados y los de 4 bits son todavía útiles en aplicaciones sencillas donde lo importante es el precio. Así, por ejemplo, para el control de un microondas puede que con un microcontrolador de 4 u 8 bits sea suficiente, mientras que para el control de frenos ABS de un automóvil sea necesario emplear uno de 16 bits.

Los microcontroladores de 32 bits encuentran su sitio en procesamiento de imágenes, las comunicaciones, el control en los procesos industriales, etc.

Un microcontrolador puede disponer de los siguientes componentes:

- **Procesador o CPU.**
- **Memoria RAM** para almacenar los datos.
- **Memoria para el programa tipo ROM.** La mayoría disponen de una memoria EEPROM o más modernas de tipo Flash (mucho más rápidas) de 16 a 1.024 bytes para almacenar datos y recuperarlos después de haber eliminado la alimentación.
- **Líneas de E/S** para comunicarse con el exterior. El número de terminales de entrada/salida varía de 4 a 70, según el modelo. Son capaces de dar o recibir corrientes en torno a los 20-25 mA, capaces de excitar directamente ciertos periféricos.
- **Módulos para el control de periféricos** (temporizadores, puertos serie, USB, conversores analógico/digital, conversores digital/analógico, comparadores, salidas PWM (modulación por ancho de pulso) para el control de motores de corriente continua, etc.).
- **Generador de impulsos de reloj** que sincroniza el funcionamiento de todo el sistema. Las frecuencias máximas más comunes de funcionamiento, según el modelo, son 4 y 10 MHz, llegando algunos a los 48 MHz.

La tensión más común en los microcontroladores es de 5 V, aunque existen modelos que se pueden alimentar con tensiones de 2 a 6,25 voltios, lo cual hace posible la alimentación mediante pilas, teniendo en cuenta su bajo consumo.

Entre los modelos más populares de microcontroladores se encuentran:

- **8052 (Fabricado por Intel):** Es un microcontrolador muy conocido debido a su facilidad de programación y sus altas prestaciones. Maneja datos de 8 bits, posee una memoria de programa interna de hasta 2 kbytes y una memoria de datos interna tipo RAM de hasta 256 kbytes. Posee 32 pines de entradas/salidas.
- **68HC11 (fabricado por Motorola y Toshiba):** Puede manejar datos de 8 o 16 bits, posee una memoria de programa interna de hasta 12 kbytes y una RAM de hasta 512 kbytes. Dispone de 38 pines de entradas/salidas.
- **PIC16F84 (fabricado por Microchip):** Maneja datos de 8 bits, su memoria de programa interna es de tan sólo 1 kbyte y su memoria RAM de datos de 68 bytes, disponiendo de 13 pines de entradas/salidas.

Uno de los fabricantes que hoy en día destaca en el desarrollo de microcontroladores por su versatilidad es Microchip (www.microchip.com), con su populares PIC (*Peripheral Interface Controller*, Controlador de interfaz periférico). Seguidamente mostramos, como ejemplo, un listado de los PIC más populares de esta firma:

- **PIC12C508/509** (con 8 pines y muy utilizado en pequeños diseños).
- **PIC16F84** (es un poco obsoleto, pero muy conocido).
- **PIC16F88** (posee más memoria que el anterior, oscilador interno, PWM, etc., lo que le hace muy versátil).
- **PIC16F87X y PIC16F87XA** (incluye muchas mejoras en el hardware; muy utilizado en proyectos de aficionados a la electrónica microprogramable).
- **PIC16F193x** (PIC optimizado y con mucha RAM, trae 49 instrucciones, en vez de las 35 de modelos más inferiores).
- **PIC18F2455** (posibilidad de conexión a puerto USB 2.0).
- **DSPIC30F3011** (especializados en el control de motores de inducción, audio, etc.).

A modo de ejemplo, en la Figura 23.22, se muestra el diagrama de conexiones del microcontrolador PIC16F84, y en la Tabla 23.3 la descripción de sus terminales.

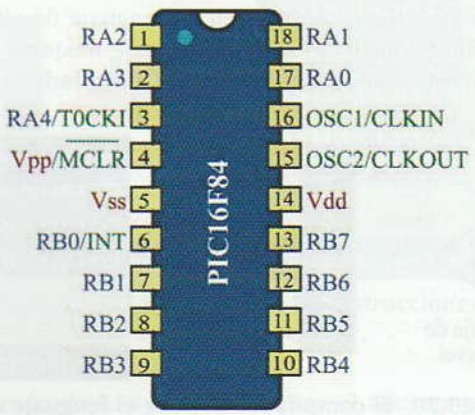


Figura 23.22. Terminales del microcontrolador PIC16F84.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Tabla 23.3. **Descripción de terminales del PIC16F84.**

Pin	Función	Descripción
14	**Vdd**	Tensión de alimentación
5	**Vss**	Masa
16	**OSC1/CLKIN**	Conexión del oscilador
15	**OSC2/CLKOUT**	Conexión del oscilador
4	**Vpp/MCLR**	Tensión de programación y reset
1-2-17-18	**RA0-RA3**	Líneas de E/S de la puerta A
3	**RA4/T0CKI**	Línea de E/S de la puerta A o entrada de impulsos de reloj para TMR0
6	**RB0/INT**	Línea de E/S de la puerta B o petición de interrupción
7-8-9-10-11-12	**RB1-RB7**	Líneas de E/S de la puerta B

Actividad propuesta 23.1

Entra en Internet y consulta la página web de microchip (http://www.microchip.com) y haz un listado con los diferentes modelos de microcontroladores PIC fabricados por esta firma.

23.6.1. Programación de microcontroladores

Con el uso de lenguajes de programación de bajo nivel (lenguaje ensamblador) se consigue un considerable ahorro en el número de códigos a la hora de escribir los programas, lo que en ocasiones resulta interesante debido a la limitación de la capacidad de la memoria de programa interna que poseen los microcontroladores. Además se consigue que la ejecución de los programas sea más rápida.

La programación en lenguaje ensamblador es bastante más compleja que la de un lenguaje de alto nivel, pero le da al programador el dominio absoluto del sistema. Los fabricantes de microcontroladores suelen facilitar el programa ensamblador de forma gratuita.

Dada la dificultad que supone para muchos usuarios el dominio de este tipo de lenguajes existe la posibilidad de utilizar lenguajes de alto nivel.

Los lenguajes de alto nivel más utilizados con microcontroladores son el C y el BASIC. Además se pueden encontrar versiones de **compiladores** e intérpretes para diferentes familias de microcontroladores.

Así, por ejemplo, para los PIC de la firma Microchip se puede utilizar el compilador PCM de C de la empresa CCS comercializado en España por Microsystems Engineering. Por otro lado, Microchip proporciona un entorno de desarrollo freeware llamado MPLAB que incluye un simulador software y un ensamblador.

23.6.2. Iniciación a la programación de microcontroladores con la placa Home Work

En la actualidad, existen muchos modelos de microcontroladores para aplicaciones de todo tipo y cada uno con sus particularidades de programación. Con el fin de que te inicies en el mundo de la programación de los microcontroladores, de una forma sencilla y didáctica, nosotros hemos seleccionado la placa Home Work (Figura 23.23) con el módulo **Basic Stamp 2** de la firma **Parallax**.

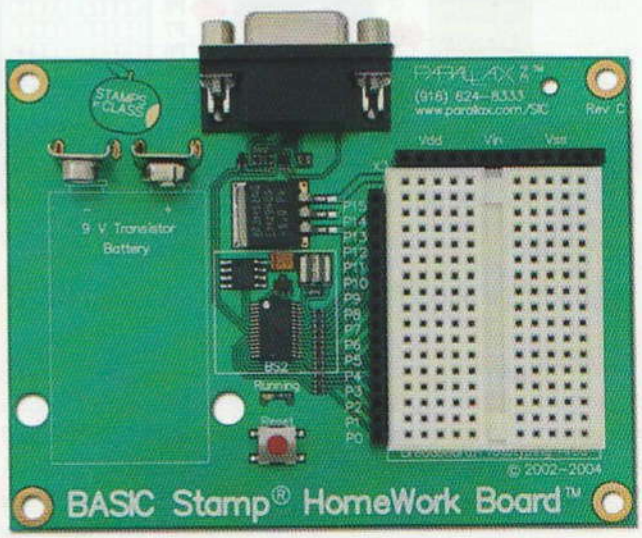


Figura 23.23. **Placa Home Work con el módulo Basic Stamp 2.**

Estos microcontroladores utilizan el lenguaje de programación **PBasic**, que destaca por su fácil manejo y alto rendimiento. A pesar de su sencillez de programación, los Basic Stamp son dispositivos industriales que están presentes en miles de procesos a nivel mundial.

La placa Home Work viene preparada para poder realizar multitud de aplicaciones de forma rápida y didáctica, para

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

lo que dispone de una placa del tipo protoboard para el montaje rápido de componentes sin tener que recurrir a la soldadura. El microcontrolador que gobierna el sistema es el PIC16C57 al que se le apoya con una memora externa EEPROM 24LC16B de 2 kbytes. La alimentación eléctrica puede realizarse con una pila de 9 V o mediante una fuente estabilizada de la misma tensión. El módulo Basic Stamp 2 incluye el regulador de tensión integrado LM2940 que proporciona una tensión de salida estabilizada de 5 V y una corriente máxima de 50 mA para la alimentación del microcontrolador. Al sistema se le añade un resonador cerámico que fija la frecuencia de reloj en 20 MHz. La placa viene provista con un conector serie para conectar con el ordenador personal del tipo RS232C. En la Figura 23.24 se muestra el esquema básico de la placa Home Work.

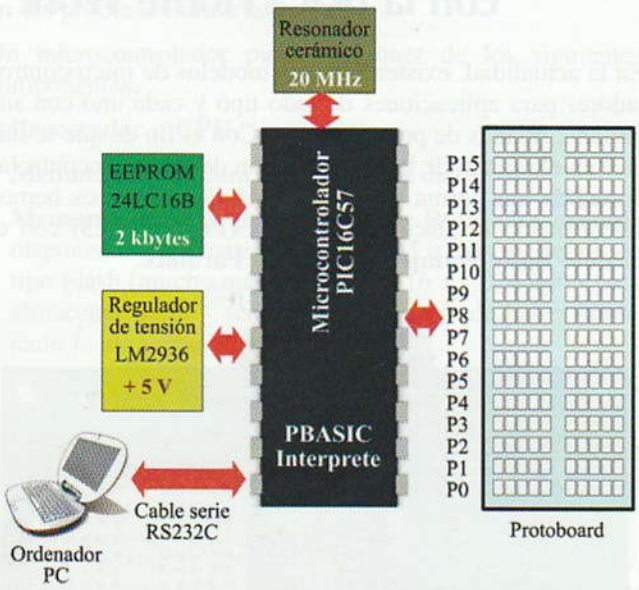


Figura 23.24. Esquema básico de la placa Home Work.

Para la programación de los microntroladores Basic Stamp, en vez de utilizar un compilador que convierta el código escrito en alto nivel en lenguaje máquina o ensamblador, se utiliza un programa intérprete que viene instalado de fábrica en el propio microcontrolador que gobierna la placa. Su funcionamiento es muy simple y facilita enormemente la tarea de programación.

Para ello, primero se escribe en el ordenador personal el programa a ejecutar en el lenguaje de programación de alto nivel PBASIC. Una vez editado el programa, se descarga desde el PC a la placa a través del cable serie RS232C. Para aumentar las posibilidades de programación, el programa en PBASIC se deposita en la memoria externa EEPROM de 2 kbytes, lo que hace posible que la placa pueda ser reprogramada una cantidad cercana a 10 millones de veces. Dado que en el microcontrolador está grabado el programa intérprete, éste va leyendo una por una las instrucciones grabadas en la memoria, las traduce y las va ejecutando en lenguaje máquina siguiendo el programa original.

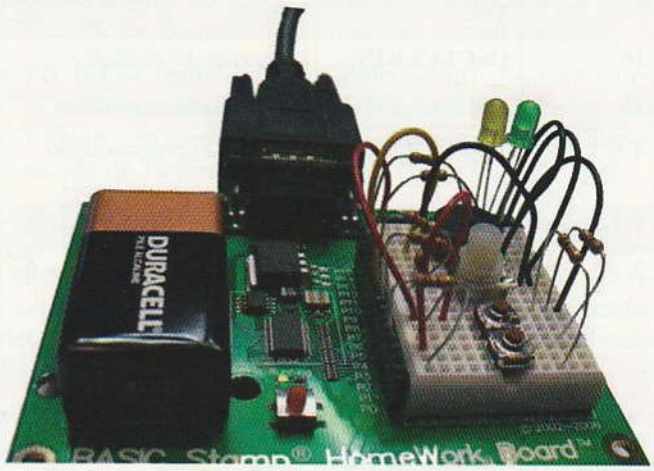


Figura 23.25. Probando un circuito con la Placa Home Work.

Actividad propuesta 23.2

Consulta la hoja de características del microncontrolador PIC16C57 que gobierna el módulo Basic Stamp 2 de la placa Home Work, dibuja el diagrama de conexiones de este circuito integrado y explica la función de cada uno de sus terminales.

*** En www.paraninfo.es podrás encontrar la hoja de características del microncontrolador PIC16C57 de Microchip.*

23.6.2.1. Características de la placa Home Work

La placa Home Work (Figura 23.26) tiene la posibilidad de conectar 16 entradas o salidas a través de la placa protoboard con la nomenclatura P0 a P15. Es capaz de ejecutar unas 4.000 instrucciones por segundo en PBASIC a 20 MHz, y la memoria puede contener unas 500 líneas de longitud de programa de PBASIC. La intensidad de corriente máxima que puede proporcionar por sus salidas es de 50 mA, y la que es posible alimentar por sus entradas es también de 50 mA.

*** En www.paraninfo.es podrás encontrar la hoja de características de la placa Home Work.*

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

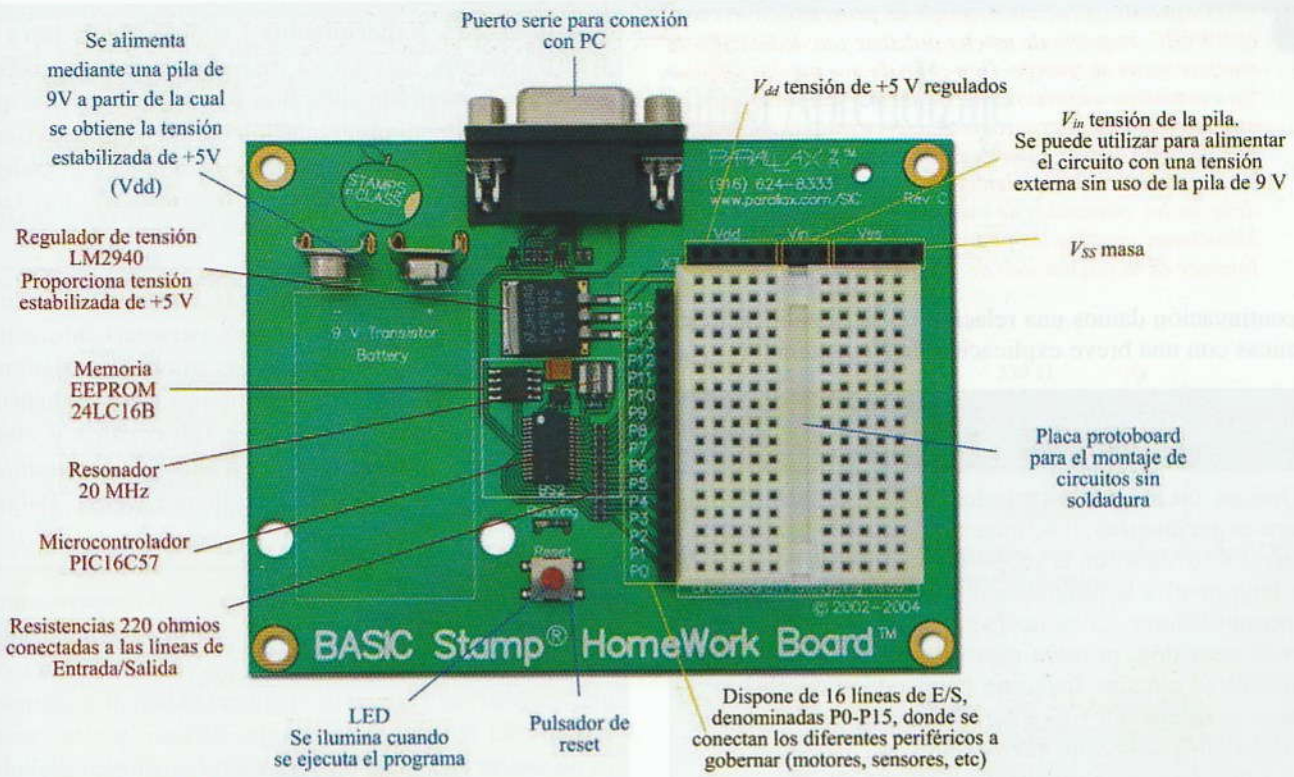


Figura 23.26. Componentes de la placa Home Work con el módulo Basic Stamp 2.

23.7 Programando con el lenguaje PBASIC

El programa PBASIC es muy sencillo de manejar ya que las instrucciones se expresan de la misma forma que nuestro lenguaje ordinario, pero en inglés. La firma Parallax distribuye de forma gratuita el software de edición en PBASIC mediante el editor Stamp BASIC para el sistema operativo Windows.

En su página web (www.parallx.com) podrás encontrar la última versión de este programa. Además del software, también podremos encontrar numerosas publicaciones técnicas que nos ayudarán al estudio y manejo de este sencillo lenguaje de programación, con la inclusión de numerosos ejercicios prácticos para llevarlos a cabo en nuestra placa Home Work.

Seguidamente se muestra el listado de las 6 instrucciones del PBASIC (Tabla 23.4) que, en un principio, vamos a manejar en las Actividades prácticas de laboratorio para iniciarnos en este mundillo de la programación.

Dado el gran número de que se compone el listado de las instrucciones del PBASIC no se han incluido en este texto, pero las podrás encontrar en www.paraninfo.es.

Tabla 23.4. Instrucciones básicas del PBASIC.

Nemónico	Función
INPUT pin	El pin indicado se selecciona como entrada.
OUTPUT pin	El pin indicado se selecciona como salida.
HIGH pin	El pin indicado se selecciona como salida. y se pone a nivel alto «1».
LOW pin	El pin indicado se selecciona como salida. y se pone a nivel bajo «0».
GOTO dirección	Salta de forma incondicional a la dirección especificada.
IF condición THEN dirección	Si se cumple cierta condición entonces salta a la dirección especificada.

Actividad propuesta 23.3

Busca en www.paraninfo.es el listado completo de las instrucciones del lenguaje de programación PBASIC y estudia su contenido. Esta información la podrás encontrar en el documento *Manual de programación BASIC Stamp 2*.

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

*** El aprendizaje de un lenguaje de programación, como el PBASIC, requiere de mucha práctica y la dedicación de muchas horas de trabajo. Con el fin de que puedas ampliar los contenidos expuestos en este texto y que te animes en este mundillo de la programación, en www.paraninfo.es se han incluido, con la autorización de la firma Parallax, una serie de publicaciones técnicas que te ayudarán a profundizar en los contenidos de esta unidad didáctica. Estas publicaciones también las podrás encontrar con facilidad en Internet en la página web de Parallax.*

A continuación damos una relación de estas publicaciones técnicas con una breve explicación de su contenido:

Publicaciones técnicas de Parallax incluidas en www.paraninfo.es como recursos web

¿Qué es un microcontrolador? Guía del estudiante para experimentos. Este manual fue creado para edades entre 15-18 años con el propósito de proveer un entorno de bajo nivel a la programación e interconexión de microcontroladores. Combina la programación y los circuitos de conexión, primero mostrando al estudiante cómo construir el circuito, luego programando el microcontrolador, y finalmente desafiándolo a mejorar el diseño. (*Traducido y adaptado al castellano por Arístides Álvarez y Ana Lusi de Álvarez.*)

Mediciones ambientales. Este manual fue creado para edades de 17 años en adelante, como continuación de «¿Qué es un microcontrolador?». Los temas introducidos son: transductores de temperatura, sonido y luz; adquisición de datos; medición de la conductancia del agua; encendido-apagado de bombas. (*Traducido y adaptado al castellano por Arístides Álvarez y Ana Lusi de Álvarez.*)

Curso teórico-practico de microcontroladores. Experimentos y códigos fuente. Este curso sobre microcontroladores fue diseñado con la finalidad de brindar al participante la oportunidad de experimentar y programar a un microcontrolador real. (*Cortesía del distribuidor de Parallax en Venezuela, ROSO Electric Supply.*)

Stamp Works. Experimentos y código fuente para el BASIC Stamp. Este kit va más allá de la teoría, ofreciendo una estupenda colección de 31 experimentos que enseñan la primera programación del Basic Stamp. Cada actividad cuenta con una explicación amplia y el código de fuente detallado de PBASIC. (*Cortesía de Ana Lusi de Álvarez.*)

Manual de programación BASIC Stamp 2. Este manual pretende ser una guía para personas que estén interesadas por el mundo de los microcontroladores y temas relacionados con automatizaciones industriales, estudiantes de electrónica e informática y cualquier persona entusiasta. (*Cortesía del distribuidor de Parallax en República Dominicana, Diego Pulgar Electric.*)

Analógico y digital básicos. Este juego de experimentos exploran muchos de los principios básicos de la adaptación de dispositivos analógicos a microcontroladores digitales. Muchas veces esto involucra el uso de comandos propios del BASIC Stamp fáciles de usar, y otras veces es necesario el uso de un «conversor analógico digital». (*Cortesía de Ana Lusi de Álvarez.*)

Control industrial. Este texto intenta introducir los conceptos y características del control de procesos con microcontroladores, con experimentos prácticos sobre los temas: escritura de un programa partiendo de un diagrama de flujo, para realizar un control de proceso secuencial; uso de pulsadores, cuenta de ciclos y procesos de E/S simples; pequeño sistema de calefacción de escritorio; introducción a la adquisición y almacenamiento de datos; etc. (*Cortesía de Ana Lusi de Álvarez.*)

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Actividades de Enseñanza Aprendizaje

COMPROBACIÓN PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

23.1 Parpadeo de dos LED. Se trata de escribir un programa con el editor de Stamp BASIC que sea capaz de hacer parpadear dos diodos LED conectados a la placa Home Work a intervalos de 1 segundo.

Lo primero que hacemos es instalar el programa Basic Stamp editor para Windos en nuestro PC. Seguidamente escribimos el siguiente programa comentado en nuestro editor en la pantalla del PC:

```
output 0        ; el pin 0 se configura como salida
output 5        ; el pin 5 se configura como salida
parpadear:      ; etiqueta, aquí comienza el bucle
low 0           ; la salida 0 se pone nivel bajo
high 5          ; la salida 5 se pone a nivel alto
pause 1000      ; el programa hace una pausa de 1000 × 1 ms =
                  1 segundo
high 0          ; la salida 0 se pone a bajo alto
low 5           ; la salida 5 se pone a nivel bajo
pause 1000      ; el programa hace una pausa de 1 segundo
goto            ; el programa salta a la siguiente línea de pro-
parpadear         grama de la etiqueta «parpadear»
```

En la práctica nos podríamos haber ahorrado la declaración de los pines de salida 0 y 5, ya que éstos quedan fijados con las instrucciones low 0; high 0 y low 5; high 5.

Una vez escrito el programa en la ventana de edición del programa, se conecta la salida serie del PC con la tarjeta Home Work mediante el cable serie estándar RS232C. Para esta operación se recomienda tener apagado el PC y haber retirado la pila de alimentación de 9 V de la tarjeta. Para descargar el programa escrito en el PC en la tarjeta del microcontrolador bastará con ejecutar el comando **RUN** desde la ventana del editor del programa Basic Stamp.

Para ver cómo parpadean los diodos LED habrá que conectarlos a las salida P0 y P15 de la protoboard a través de resistencias de 330 ohmios, tal como se muestra en el esquema de conexionado de la Figura 23.27.

En la Figura 23.28 se muestra el esquema práctico del circuito sobre la placa protoboard de la placa Home Work.

Una vez montado y probado el circuito, modifica el programa para conseguir que los diodos parpadeen

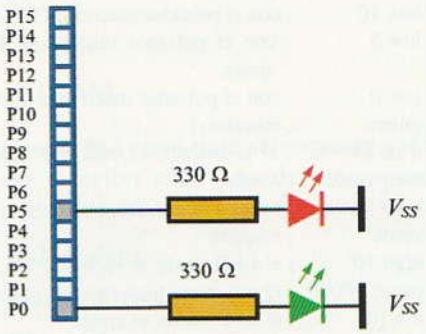


Figura 23.27. Esquema del circuito de dos LED intermitentes.

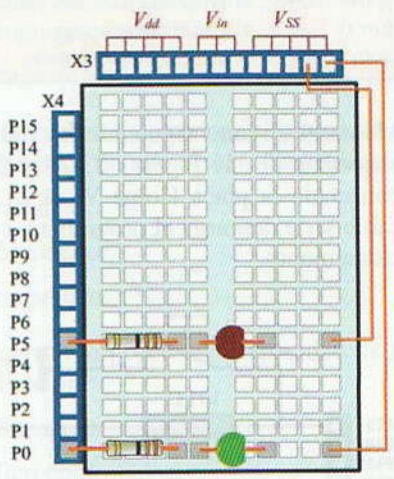


Figura 23.28. Montaje práctico del circuito sobre la placa protoboard de la placa Home Work.

de forma asimétrica, por ejemplo hacer que el primer diodo parpadee en ciclos de 1 segundo, mientras que el segundo diodo lo haga cada 2 segundos de forma alternativa.

23.2 Luces para semáforo. Se trata de diseñar un circuito que simule el funcionamiento de un semáforo. Para ello dispondremos de un pulsador con el que se iniciará la secuencia, un diodo LED de color verde que se encenderá durante 10 segundos al accionar el pulsador, un diodo LED naranja que se activará al apagarse el verde, y un LED rojo que se encenderá a los 3 segundos de haberse encendido el naranja y una vez apagado éste. El LED rojo permanecerá encendido durante otros 10 segundos, al final del ciclo

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

todos los LED deberán permanecer apagados hasta que se vuelva a activar el pulsador.

El programa para el semáforo podría ser el siguiente:

```
input 15        ; se configura el pin 15 como entrada para el
                  pulsador
low 10          ; con el pulsador inactivo el LED verde se apaga
low 5           ; con el pulsador inactivo el LED naranja se
                  apaga
low 0           ; con el pulsador inactivo el LED rojo se apaga
inicio:         ; etiqueta
if in 15 = 0    ; si la entrada 15 está a 0 saltar a la etiqueta
then verde        verde
goto inicio     ; saltar a la etiqueta inicio
verde:          ; etiqueta
high 10         ; el LED verde se enciende
pause 10000     ; el programa hace una pausa de 10 segundos
low10           ; el LED verde se apaga
high 5          ; el LED naranja se enciende
pause 3000      ; el programa hace una pausa de 3 segundos
low 5           ; el LED naranja se apaga
high 0          ; el LED rojo se enciende
pause 10000     ; el programa hace una pausa de 10 segundos
low 0           ; el LED rojo se apaga
goto inicio     ; saltar a la etiqueta inicio
```

Monta el circuito siguiendo las indicaciones de los esquemas de las Figuras 23.29 y 23.30 y una vez conectada la placa Home Work al PC mediante el cable serie descarga el programa y comprueba su fucionamiento.

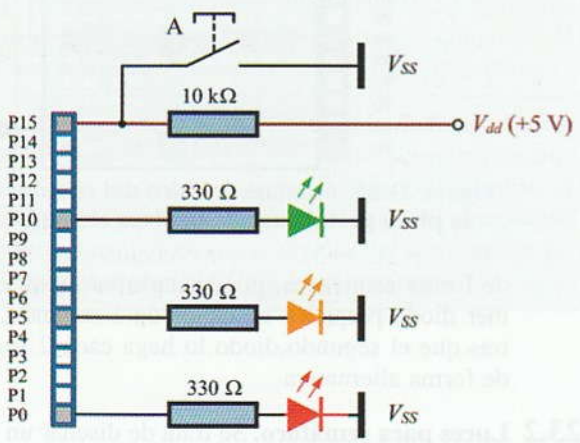


Figura 23.29. Esquema del circuito del semáforo.

Observa cómo hemos conectado la entrada P15 de forma permanente a la tensión V_{dd} estabilizada de +5 V a través de la resistencia de 10 kΩ. Por otro lado se ha conectado esta entrada a uno de los terminales del pulsador A de tal forma que, mientras no se presione el pulsador, la tensión que se le suministra a la entrada P15 es de nivel alto, es decir un «1» lógico. Al accionar este pulsador se conecta P15 a masa inyectando a esta entrada un «0» lógico, tal como habíamos previsto en nuestro programa.

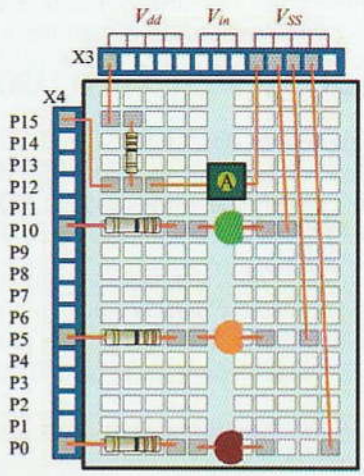


Figura 23.30. Montaje práctico del semáforo sobre la placa protoboard de la placa Home Work.

Modificación del programa. Una vez que hemos comprobado el funcionamiento correcto del programa deseamos mejorar su funcionamiento, para lo que proponemos lo siguiente: hacer que el ciclo de encendido del semáforo, una vez iniciado por el pulsador A, continúe de forma indefinida hasta que pulsemos otro pulsador de paro B. El programa modificado podría quedar así:

```
input 15        ; se configura el pin 15 como entrada para el
                  pulsador A
input 12        ; se configura el pin 15 como entrada para el
                  pulsador B
apagado:        ; etiqueta
low 10          ; el LED verde se apaga
low 5           ; el LED naranja se apaga
low 0           ; el LED rojo se apaga
inicio:         ; etiqueta
if in 15 = 0    ; si la entrada 15 está a 0 saltar a la etiqueta
then verde        verde
goto inicio     ; saltar a la etiqueta inicio
verde:          ; etiqueta
high 10         ; el LED verde se enciende
pause 10000     ; el programa hace una pausa de 10 segundos
low10           ; el LED verde se apaga
high 5          ; el LED naranja se enciende
pause 3000      ; el programa hace una pausa de 3 segundos
low 5           ; el LED naranja se apaga
high 0          ; el LED rojo se enciende
pause 10000     ; el programa hace una pausa de 10 segundos
low 0           ; el LED rojo se apaga
if in 12 = 0    ; si la entrada 12 está a 0 saltar a la etiqueta
then apagado      apagado
goto verde      ; saltar a la etiqueta verde
```


© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Una vez escrito el programa en la ventana del Basic Stamp editor comprobar su funcionamiento con la placa Home Work. Para ello deberás modificar también el circuito en la placa protoboard (hardware), incorporando un nuevo pulsador B a la entrada P12. Realiza el nuevo esquema del circuito y comprueba su funcionamiento.

AUTOEVALUACIÓN

23.1 ¿Cuál es el dispositivo de un microprocesador encargado de realizar los cálculos, comparaciones y la toma de decisiones lógicas?

A ❑ La unidad de control.

B ❑ Los registros.

C ❑ La unidad aritmético-lógica.

23.2 ¿Cuál es el dispositivo de un microprocesador encargado de almacenar la información de forma temporal?

A ❑ La unidad de control.

B ❑ Los registros.

C ❑ La unidad aritmético-lógica.

23.3 ¿Cuál es el dispositivo de un microprocesador encargado de interpretar y ejecutar las instrucciones?

A ❑ La unidad de control.

B ❑ Los registros.

C ❑ La unidad aritmético-lógica.

23.4 Un byte de memoria equivale a un conjunto de:

A ❑ 8 bits.

B ❑ 4 bits.

C ❑ 1 bit.

23.5 Un kbyte de memoria equivale a:

A ❑ 1.000 bytes.

B ❑ 1.024 bits.

C ❑ 1.024 bytes.

23.6 ¿Qué tipo de memoria es de sólo lectura?

A ❑ ROM.

B ❑ RAM.

C ❑ SRAM.

23.7 ¿En qué tipo de memoria ROM, una vez grabada, existe la posibilidad de borrar su contenido, por medio de un circuito electrónico, para poder ser grabada otra vez por el usuario?

A ❑ EPROM.

B ❑ EEPROM.

C ❑ REPROM.

23.8 ¿Qué tipo de memoria RAM es más rápida?

A ❑ SRAM.

B ❑ DRAM.

C ❑ JETRAM.

23.9 ¿Qué tipo de bus sirve para seleccionar qué unidad debe dar o recibir cada dato del microprocesador (lectura/escritura)?

A ❑ Bus de datos.

B ❑ Bus de direcciones.

C ❑ Bus de control.

23.10 El PBASIC es un lenguaje de programación del tipo:

A ❑ Lenguaje máquina.

B ❑ Lenguaje ensamblador.

C ❑ Lenguaje de alto nivel.

23.11 ¿Con qué nombre se le conoce al programa que traduce el lenguaje de alto nivel a lenguaje máquina?

A ❑ Traductor.

B ❑ Compilador.

C ❑ Transductor.

23.12 ¿Qué dispositivo posee más capacidad de proceso de información?

A ❑ Microprocesador.

B ❑ Microcontrolador.

23.13 El programa intérprete que utiliza la placa Home Work para traducir las instrucciones de alto nivel en PBASIC, programadas por el usuario, en instrucciones en el lenguaje ensamblador que entienda el propio microcontrolador, se aloja en:

A ❑ El PIC.

B ❑ La EEPROM.

C ❑ En el software del PC.

AMPLIACIÓN

23.1 Las aplicaciones de los microcontroladores son enormes. A continuación se muestran algunas de las áreas de aplicación del módulo Basic Stamp 2 de la placa Home Work:

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

- Electrónica industrial (automatizaciones).
- Comunicaciones e interfase con otros equipos (RS-232).
- Interfase con otros microcontroladores.
- Equipos de mediciones.
- Equipos de diagnósticos.
- Equipos de adquisición de datos.
- Robótica (servomecanismos).
- Proyectos musicales.
- Proyectos de física.
- Proyectos donde se requiera automatizar procesos artísticos.
- Programación de otros microcontroladores.
- Interfase con otros dispositivos de lógica TTL:
  - Teclado.
  - Pantallas LCD.
  - Protocolo de comunicación X-10.
  - Sensores.
  - Memorias.
  - Real Time Clock (RTC).
  - A/D, D/A, potenciómetros digitales.

El dominio de un lenguaje de programación es como el dominio de una lengua extranjera, sólo se aprende a fuerza de practicar y practicar. Con el fin de que te animes a iniciarte en este mundillo de la programación, te proponemos que consigas el robot Boe-Bot de la firma Parallax (Figura 23.31).

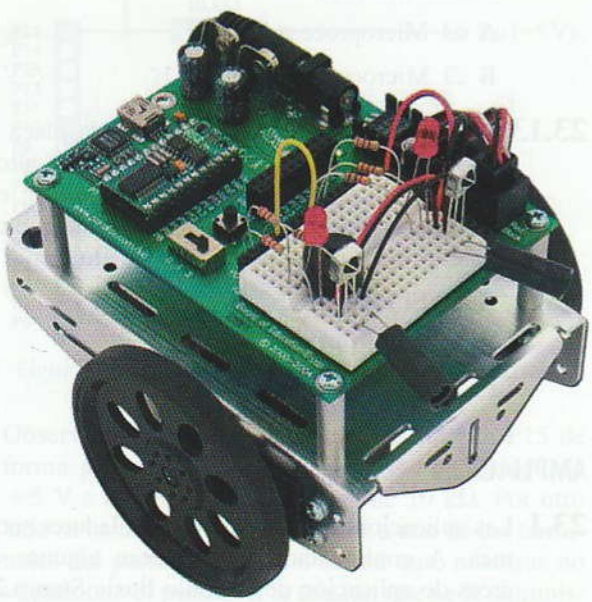


Figura 23.31. Robot Boe-Bot de la firma Parallax.

Este pequeño robot didáctico viene equipado con el microcontrolador Basic Stamp 2 de la firma Parallax. Con él podrás realizar una gran variedad de proyectos prácticos y podrás experimentar las enormes posibilidades de los sistemas microprogramables.

Para ayudarte en esta ardua tarea, en www.paraninfo.es podrás encontrar las siguientes publicaciones técnicas:

- **Robótica con el Boe-Bot.** Los temas que incluye este manual son: navegación básica del Boe-Bot bajo el control del programa, navegación en función de las señales generadas por los sensores, navegación usando realimentación y varias técnicas de control y navegación usando inteligencia artificial programada. Cada tema comienza con una introducción diseñada para lograr una comprensión conceptual, seguida por algunas experiencias prácticas. Aquellos que piensen profundizar en tecnología industrial, electrónica o robótica, recibirán grandes beneficios de las experiencias iniciales obtenidas con estos temas. (*Cortesía de Francisco Zabala.*).
- **Manual de montaje y programación del robot Home Boe Bot.** El presente tutorial está basado en los manuales y productos de Parallax y se ha redactado en Ingeniería de Microsistemas Programados, S. L. para personas que comienzan desde el principio. Sólo hay que saber usar el PC y tener las nociones fundamentales de electricidad y programación. ¡Lo imprescindible es el interés y la curiosidad! (*Cortesía del distribuidor de Parallax en España, Ingeniería de Microsistemas Programados.*)

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Solución a los ejercicios de autoevaluación

1.1 B
1.2 C
1.3 A
1.4 C
1.5 B
1.6 21 mA

2.1 A
2.2 B
2.3 30 mA, 45 mW
2.4 125,4 V
2.5 110 Ω, 440 W
2.6 1.º – 0,1 Ω, 2,5 W
2.º – 100 V, 2 kW
3.º – 166,7 V, 5,6 kΩ
4.º – 0,5 mA, 400 kΩ
5.º – 6.667 W, 0,67 mA
6.º – 24,5 V, 40,8 A
2.7 B
2.8 B
2.9 Aproximadamente igual
2.10 0,3 mm^2
2.11 100 m
2.12 6,17 Ω
2.13 66,05 Ω; 4 °C
2.14 $P = 75$ W, $R = 133$ Ω
2.15 $V = 237$ V, $I = 3{,}16$ A
2.16 a) $I = 13{,}6$ A, $R = 16{,}2$ Ω; b) $P = 968$ W
2.17 a) 11,36 A; b) 19,36 Ω; c) 150 kWh
2.18 a) 5,8 A; b) 105,6 €
2.19 $R_1 = 27\ k\Omega \pm 10\%$; $R_2 = 12\ k\Omega \pm 2\%$; $R_3 = 1.500\ M\Omega \pm 5\%$
2.20 R_1: (rojo, amarillo, naranja, oro), R_2: (azul, gris, azul, plata), R_3: (marrón, marrón, amarillo, rojo)
2.21 C
2.22 C
2.23 C

3.1 $I = 0{,}5$ A, $V_1 = 100$ V, $V_2 = 70$ V, $V_3 = 50$ V, $P_1 = 50$ W, $P_2 = 35$ W, $P_3 = 25$ W, $P_T = 110$ W, $R_T = 440$ Ω
3.2 21 V
3.3 31 Ω
3.4 N.º 1 (96,8 Ω; 132 V; 179 W), N.º 2 (64,5 Ω; 88 V; 119 W), Total (161,3 Ω; 1,36 A, 298 W)
3.5 13,5 Ω; 16,7 W
3.6 $R_T = 2$ Ω; $I_1 = 2$ A; $I_2 = 3$ A; $I_3 = 1$ A; $I_T = 6$ A; $P_1 = 24$ W; $P_2 = 36$ W; $P_3 = 12$ W; $P_T = 72$ W
3.7 215 Ω; 1,02 A
3.8 4 Ω
3.9 a) $R_T = 50$ Ω; b) $I = 500$ mA; $I_T = 10$ A; c) $P = 250$ W; $P_T = 5.000$ W
3.10 $R_1 = 24{,}2$ Ω; $R_2 = 8{,}07$ Ω; $R_3 = 16{,}13$ Ω
3.11 A y B

WWW.AUTODIDACTA.INFO

3.12 A y C

3.13 R_T: (27 Ω, 7,4 A; 1.480 W)

3.14 R_1: (3,7 A; 37 V; 137 W)
R_2: (5 A; 100 V; 500 W)
R_3: (2,1 A; 63 V; 132 W)
R_4: (1,6 A; 63 V; 101 W)
R_T: (8,7 A; 100 V; 870 W)

3.15 30 V

3.16 R_1: (1 V; 0,25 A); R_2: (1 V; 0,1 A)
R_3: (1 V; 0,125 A) R_T: (1 V; 0,475 A)

3.17 a) 20 V; b) 17,4 V; 2,17 A; c) 87 %; d) 16,7 A; e) 17,6 V

3.18 a) 2 V; b) 1,99 V; 0,25 A; c) 99,4 %; d) 166 A; e) 1,98 V

3.19 a) $I = 50$ A; $R = 0{,}35\ \Omega$; $P = 875$ W; b) $P_u = 87{,}5$ W

3.20 A

3.21 B

3.22 C

3.23 $I_1 = 1{,}25$ A; $I_2 = -0{,}75$ A; $I_3 = 0{,}5$ A

3.24 0,7 V

4.1 C

4.2 A

4.3 C

4.4 B

4.5 C

4.6 0,004 C; 0,02 C; 0,1 C

4.7 0,49 mm

4.8 $\tau = 0{,}01$ s, $t = 0{,}05$ s

4.9 $C_1 = 27$ nF ± 5%, 630 V
$C_2 = 12$ nF ± 1%, 250 V
$C_3 = 2{,}5$ nF ± 10%, 400 V

4.10 Disco (6,3 nF); Tubular (3,5 nF ± 1%)

4.11 C_1 = Naranja, naranja, verde, negro
C_2 = Verde, violeta, azul, gris
C_3 = Marrón, verde, violeta, rojo

4.12 B

4.13 A

4.14 B

4.15 $C_T = 2$ µF; $Q_T = Q_1 = Q_2 = 0{,}0002$ C; $V_1 = 33{,}33$ V; $V_2 = 66{,}67$ V

4.16 $C_T = 20$ µF; $Q_T = 0{,}002$ C; $Q_1 = 0{,}0005$ C; $Q_2 = 0{,}0015$ C

5.1 A

5.2 C

5.3 B

5.4 $\mu = 1{,}25 \cdot 10^{-4}$ H/m

5.5 $\mu = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ H/m; $\mu_r = 119{,}4$

5.6 $B_o = 0{,}0025\ T$

5.7 $H = 3.000$ AV/m; $\phi = 6 \cdot 10^{-4}$ Wb

5.8 $\Phi = 0{,}6$ mWb; H = 300 Av; $\mathcal{F} = 75$ Av

5.9 $L_{aire} = 1{,}98$ µH; $L_{Fe} = 19{,}8$ µH

6.1 B

6.2 C

6.3 A

6.4 B

6.5 B

6.6 C

6.7 A

6.8 141 V

6.9 200 Hz

6.10 537 V

6.11 $V_{máx} = 50$ V; $V = 35$ V; $T = 0{,}05$ s; $f = 20$ Hz; $v = 29$ V

6.12 96 V; 252 V; 311 V; 296 V; 0 V; −96 V; −252 V; 0 V

6.13 127 V

6.14 a) 4,24 V; b) 0 V; 6,67 Hz

6.15 $I = 4{,}4$ A; $P = 968$ W; $E = 7{,}7$ kWh

6.16 $X_L = 150{,}8\ \Omega$; $I = 2{,}5$ A; $Q_L = 943$ VAR; $E = 0$ kWh

6.17 $I = 6{,}3$ A; $Q_C = 314$ VAR

7.1 B y C

7.2 B

7.3 A

7.4 $Z = 93\ \Omega$; $I = 2{,}36$ A; $\varphi = 57{,}3^{o}$; $V_R = 118$ V; $V_L = 185$ V; $P = 280$ W; $Q = 437$ VAR; $S = 519$ VA; $\cos\varphi = 0{,}54$

7.5 $I = 4{,}9$ mA; $\cos\varphi = 0{,}49$; $V_R = 49$ V; $V_C = 87$ V; $P = 0{,}24$ W; $Q = 0{,}43$ VAR; $S = 0{,}49$ VA

7.6 $I = 6{,}75$ A; $V_R = 67{,}5$ V; $V_C = 215$ V; $V_L = 424$ V; $P = 459$ W; $Q = 1.412$ VAR; $S = 1.485$ VA; $\cos\varphi = 0{,}31$ (inductivo)

7.7 $\cos\varphi = 0{,}73$

7.8 8,4 µF , 181 V

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

7.9 $I = 0{,}5$ A; $V_1 = 126$ V; $V_2 = 95$ V; $\cos\varphi = 0{,}1$; $P = 11$ W; $Q = 109$ VAR; $S = 110$ VA

7.10 $I = 1{,}37$ A; $\cos\varphi = 0{,}62$; $P = 187$ W; $Q = 235$ VAR; $S = 301$ VA.

7.11 192 V; 19,6 Hz

7.12 $R_{\text{adicional}} = 79{,}5\ \Omega$

7.13 A y C

7.14 $\cos\varphi = 0{,}73$

7.15 Características de batería: (10 kVAR; 230 V; 604 µF); $I_{\cos\varphi=0{,}6} = 72$ A; $I_{\cos\varphi=0{,}95} = 46$ A

7.16 1 µF/230 V

7.17 7,6 µF, 193 V

7.18 125,8 Hz; 3.162 V

7.19 10,13 µF

8.1 B

8.2 B

8.3 A y C

8.4 C

8.5 A

8.6 $P = 8{,}96$ kW; $Q = 7{,}9$ kVAR; $S = 11{,}94$ kVA

8.7 0,95

8.8 a) $S = 77$ kVA; $I_{L\,\text{pri.}} = 1{,}85$ A; $I_{L\,\text{sec.}} = 111$ A;
b) $S' = 51$ kVA; $I'_{L\,\text{pri.}} = 1{,}23$ A; $I'_{L\,\text{sec.}} = 77{,}6$ A

8.9 $P = 5.290$ W; $I_L = 13{,}3$ A; $I_f = 13{,}3$ A

8.10 15.870 W; $I_L = 39{,}8$; $I_f = 23$ A

8.11 $I_L = 8{,}86$ A; $I_f = 5{,}12$ A; $Q = 4.665$ VAR; $S = 6.138$ VA

8.12 $\cos\varphi = 0{,}76$; $Q = 25{,}2$ kVAR; $S = 38{,}8$ kVA

9.1 $E_{ab} = 15$ mA; $E_r = 4{,}5\%$

9.2 B

9.3 B

9.4 B

9.5 A

9.6 C

9.7 A

9.8 B

9.9 A

9.10 B

10.1 C

10.2 B

10.3 350 mW

10.4 9,3 mA

10.5 0,85 V; 0,83 A, 706 mW

10.6 1N4003

10.7 246,5 Ω

10.8 A

10.9 B

10.10 2,7 kΩ/1 W

11.1 B

11.2 A y C

11.3 $m = 3{,}33$, $V_2 = 60$ V

11.4 7,4 V

11.5 62,8 V

11.6 a) $I_D = 106$ mA, $V_{\text{inversa pico}} = 33{,}9$ V, $V_{CC} = 10{,}6$ V, $I_{CC} = 106$ mA
b) $I_D = 52$ mA, $V_{\text{inversa pico}} = 33{,}9$ V, $V_{CC} = 10{,}4$ V, $I_{CC} = 104$ mA
c) $I_D = 104$ mA, $V_{\text{inversa pico}} = 33{,}9$ V, $V_{CC} = 20{,}7$ V, $I_{CC} = 207$ mA

11.7 1N914

11.8 1N4001

11.9 $C = 871$ µF, $V_{CC} = 14{,}7$ V, $V_{\text{riz}} = 1{,}7$ V, $I_{CC} = 147$ mA

11.10 $V_{\text{riz}} = 2{,}6$ V, Factor de rizado = 8,4%

12.1 A

12.2 B

12.3 A

12.4 A

12.5 B

12.6 $\beta = 49$

12.7 B y C

12.8 A

12.9 A, B, C y D

12.10 C

12.11 250 mW

12.12 100 mA

12.13 a) 107; b) 210; c) 270

12.14 corte ($I_C = 0$; $V_{CE} = 3$ V; $I_B = 0$); saturación ($I_C = 80$ mA; $V_{CE} = 0{,}6$ V; $I_B = 1.000$ µA); trabajo ($I_C = 55$ mA; $V_{CE} = 1{,}4$ V; $I_B = 300$ µA)

12.15 a) y d)

12.17 a)

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

12.18 $I_C = 10$ mA, $V_{CE} = 1$ V; $V_B = 1{,}7$ V; $V_E = 1$ V; $V_C = 2$ V

13.1 B
13.2 C
13.3 $A_v = 333$, $A_i = 10$, $A_p = 3.330$
13.4 A
13.5 B
13.6 C
13.7 A
13.8 C
13.9 B
13.10 7,6 µF
13.11 A
13.12 C
13.13 B
13.14 20,8%
13.15 6 A
13.16 30.000
13.17 14 W

14.1 A
14.2 B
14.3 C
14.4 A y C
14.5 A
14.6 a) MOSFET de empobrecimiento de canal N
b) Transistor bipolar NPN
c) MOSFET de empobrecimiento de canal P
d) FET de canal N
e) MOSFET de enriquecimiento de canal N
f) MOSFET de enriquecimiento de canal P
g) FET de canal P
h) Transistor bipolar PNP
14.7 5,33 mA
14.8 9 mA, −4 V
14.9 B y C
14.10 A
14.11 B
14.12 A
14.13 $R_S = 1{,}5$ kΩ
14.14 B
14.15 C
14.16 $V_S = 9$ V; $V_G = 5{,}22$ V; $V_{GS} = -3{,}78$ V

15.1 A
15.2 A y C
15.3 C
15.4 A
15.5 a) B; b) $A_{V(LC)} = 11$; c) $V_{sal} = 110$ mV
15.6 A, lectura del voltímetro = 1,6 V
15.7 C, lectura del amperímetro = 22 µA
15.8 $R_r = 2$ MΩ; 2,5 µA; $K = 2$ V/µA

16.1 B
16.2 B
16.3 C
16.4 600 mW
16.5 175 mV
16.6 750 Ω
16.7 225 mW
16.8 $V_z = 12{,}1$ V; $I_z = 6{,}25$ mA, $P = 2{,}12$ W
16.9 $V_{sal} = 10{,}05$ V
16.10 8,75 V a 35 V
16.11 Entre 0,6 y 0,7 A
16.12 0,22%; $R_i = 0{,}05$ Ω
16.13 11,988 V
16.14 $R_2 = 532$ Ω; $V_{sal} = 24{,}8$ V; $P = 1{,}4$ W
16.15 10 Ω

17.1 A
17.2 B
17.3 C
17.4 C
17.5 B
17.6 A
17.7 144,4 kHz
17.8 3,18 nF
17.9 5,03 MHz
17.10 25,33 µH
17.11 $t_1 = 1{,}39$ ms, $t_2 = 3{,}53$ ms, $f = 203$ Hz.
17.12 a) A, b) se activa a 3,33 V y se desactiva a 6,67 V; $f = 4{,}81$ Hz
18.1 B
18.2 C
18.3 B
18.4 C
18.5 3,7 V
18.6 16,7 V

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

19.1 B
19.2 B
19.3 C
19.4 A
19.5 C
19.6 A
19.7 C
19.8 $V_{NH} = 0{,}7$ V; $V_{NL} = 0{,}3$ V
19.9 C
19.10 A y B
19.11 C
19.12 C
19.13 A) 63; B) 341; C) 23
19.14 A) 10110110010;
B) 101000100;
C) 1010110
19.15 A) 10100110;
B) 011101110111100;
C) 10110110010;
D) 10101110110011010;
E) 10100101100
19.16 A) 312_8; CA_{16}; 1000000010_{BCD}
B) 1256_8; $2AE_{16}$; 11010000110_{BCD}

20.1 A) $S = \bar{A} + \bar{B}$
B) $S = \bar{A}\bar{B} + B\bar{C} + \bar{B}C$
C) $S = \bar{A}B + A\bar{B}\bar{C} + \bar{A}C + BC$
D) $S = \bar{A}D + BCD$
E) $S = \bar{A}\bar{C}D + ABCD + \bar{B}C\bar{D} + \bar{A}C\bar{D}$

20.2 A) $S = \overline{A \cdot \overline{B\bar{C}}}$
B) $S = \overline{\overline{A\bar{C}} \cdot \overline{A\bar{D}} \cdot \overline{\bar{B}\bar{D}}}$
C) $S = \overline{\overline{A\bar{D}} \cdot \overline{A\bar{B}C} \cdot \overline{C\bar{D}}}$

20.3 $S_2 = \bar{A}B\bar{C}D$
$S_1 = \bar{A}B\bar{C}D + \bar{A}\bar{B}CD$
20.4 $S = A\bar{B}\bar{C}D + \bar{A}\bar{B}CD + ABCD + \bar{A}B\bar{C}$

21.1 A
21.2 B
21.3 C
21.4 C
21.6 A
21.7 B
21.8 C
21.10 A
21.11 B
21.12 A
21.13 B
21.14 A
21.15 C
21.16 A
21.17 B
21.18 a) 256, b) 0,0196078 V, c) 10011001_2

22.1 B
22.2 B
22.3 A
22.4 A
22.5 C
22.6 A
22.11 1E, 2D, 3F, 4A, 5C, 6B
22.12 C
22.13 B
22.14 C
22.15 B
22.16 A
22.17 100 Hz

23.1 A
23.2 B
23.3 A
23.4 A
23.5 C
23.6 A
23.7 B
23.8 A
23.9 C
23.10 C
23.11 B
23.12 A
23.13 A

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Recursos de aprendizaje en www.paraninfo.es	
UU.DD.	**Materiales y ejemplos prácticos**
1	
2	Solución a las Actividades propuestas: 2.1-2.2-2.3-2.4 Ejercicios de evaluación 2 Codificación de resistencias SMD Series de resistencias normalizadas y comercializadas Valores típicos y características de las resistencias fijas
3	Solución a las Actividades propuestas: 3.1-3.2-3.3-3.4 Ejercicios de evaluación 3 Resolución de sistemas de ecuaciones mediante determinantes Hojas de cálculo para la resolución de sistemas de ecuaciones
4	Solución a las Actividades propuestas: 4.1-4.2-4.3-4.4-4.5-4.6 Ejercicios de evaluación 4 Código JIS para identificación de condensadores Ejemplos prácticos de identificación de condensadores
5	Solución a las Actividades propuestas: 5.1-5.2 Ejercicios de evaluación 5
6	Solución a la Actividad propuesta: 6.1 Ejercicios de evaluación 6 Conocimientos básicos de trigonometría
7	Solución a la Actividad propuesta: 7.1 Ejercicios de evaluación 7
8	Solución a la Actividad propuesta: 8.1 Ejercicios de evaluación 8
9	Manual del usuario del polímetro digital (FluKe) Características y ventajas de los osciloscopios digitales (Tektronix) Técnicas de medida con el osciloscopio (Hameg) Ejemplo de Manual del usuario de un osciloscopio analógico (Hameg) Ejemplo de Manual del usuario de un osciloscopio digital (Tektronix) Manual técnico del analizador lógico (Tektronix)
10	Hoja de características de los diodos 1N4001 a 1N4007
11	
12	Códigos de identificación de semiconductores Obtención de la curva $IC = f(IB)$ de un transistor (Práctica laboratorio 12.4) Amplificación de corriente y recta de carga de un transistor (Práctica laboratorio 12.5) Análisis de la polarización de un transistor por realimentación del emisor con divisor de tensión (Práctica laboratorio 12.6) Circuito de encendido por falta de luz (Circuito práctico de ampliación 12.2) Circuito de encendido por presencia de luz (Circuito práctico de ampliación 12.3) Circuito temporizador a la desconexión (Circuito práctico de ampliación 12.4) Circuito detector de humedad (Circuito práctico de ampliación 12.5) Hojas de características de los transistores BC107-109; BC546-550; BD135-139
13	Circuito de preamplificador para micrófono (Circuito práctico de ampliación 13.1) Circuito amplificador de audio de 10 W (Circuito práctico de ampliación 13.2) Circuito amplificador de audio estéreo de 2 × 10 W (Circuito práctico de ampliación 13.3) Hojas de características del transistor BC108A Hojas de características de los transistores BD136-139 Hojas de características del amplificador de audio integrado LM384 Hojas de características del amplificador de audio integrado TDA2003 Hojas de características del amplificador de audio integrado TDA2009
14	Hojas de características de los transistores 2N5457 - 5459

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

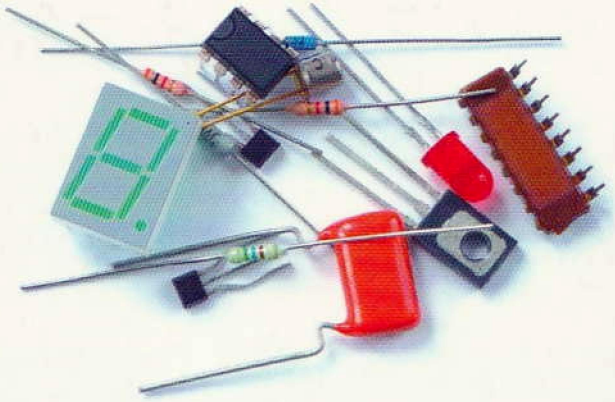
Recursos de aprendizaje en www.paraninfo.es	
UU.DD.	**Materiales y ejemplos prácticos**
15	Circuito de señalización luminosa por aumento de temperatura (Circuito práctico de ampliación 15.1) Hojas de características del transistor BC337 Hojas de características del amplificador del operacional LM741 y del TL081
16	Circuito de fuente de alimentación regulable de 15 V/1 A (Circuito práctico de ampliación 16.1) Circuito de fuente de alimentación simétrica de 15 V/1 A (Circuito práctico de ampliación 16.2) Hojas de características de los reguladores integrados LM78xx, LM79xx, LM317 y TEA2018 Hojas de características de los diodos Zener BZX85-c3v6-c62 y ZPD2,7-51. Hojas de características del transistor 2N3055
17	Circuito de multivibrador astable con 555 (Circuito práctico de ampliación 17.1) Circuito de temporizador monoestable con 555 (Circuito práctico de ampliación 17.2) Circuito de alarma activada por luz con 555 (Circuito práctico de ampliación 17.3) Circuito de sirena bitonal (Circuito práctico de ampliación 17.4) Hoja de características del temporizador integrado 555 Hoja de características de los transistores 2N3906; BC556-560 Hoja características BC636-640 Hoja de características del fotodiodo BPW40 Hoja de características del oscilador integrado ICL8038
18	Hoja de características de los SCR 2N681A-692A y CE100AL
19	Solución a las Actividades propuestas: 19.1-19.2-19.3 55 Ejercicios resueltos de conversión de sistemas de numeración Equivalencias del código ASCII Manual del Universal Trainer Hoja de características de los circuitos integrados: 74F00, 74F02, 74F04, 74F08, 74F32, 74F86, 74AHCT00, 74AHCT02, 74AHCT04, 74AHCT08, 74AHCT30, 74AHCT32, 74AHCT86, 74HCT00, 74HCT02,74HCT04, 74HCT08, 74HCT30, 74HCT32, 74HCT86
20	Solución a las Actividades propuestas: 20.1-20.2 10 Ejercicios resueltos de diseño de circuitos con puertas lógicas 14 Ejercicios resueltos de simplificación de funciones lógicas Diseño de circuito de riego automático con puertas lógicas
21	Hoja de características de los circuitos integrados: 74LS47, 74HC138, 74HCT147, 74HCT154, DAC0800, ADC0804
22	Hoja de características de los circuitos integrados 74HCT112, 74LS165, 74LS194, 74LS90, 74LS171
23	Hoja de características del microcontrolador PIC16C57 Hoja de características del microcontrolador PIC16F84 Hoja de características de la placa Home Work ¿Qué es un microcontrolador? Guía del estudiante para experimentos Mediciones ambientales Curso teórico-práctico de microcontroladores. Experimentos y códigos fuente Stamp Works. Experimentos y código fuente para el BASIC Stamp Manual de programación BASIC Stamp 2 Analógico y digital básicos. Control industrial Robótica con el Boe-Bot Manual de montaje y programación del robot Home Boe Bot

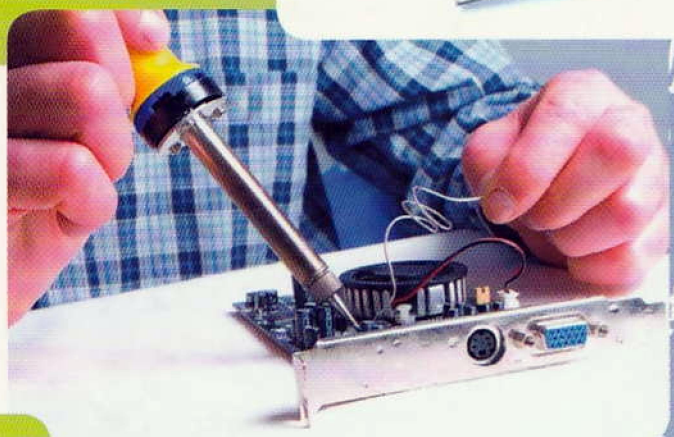
Duoc UC BIBLIOTECA Sede Maipú

© Ediciones Paraninfo

WWW.AUTODIDACTA.INFO

Instalaciones de Telecomunicaciones





Electrónica aplicada

ELECTRICIDAD - ELECTRÓNICA

WWW.AUTODIDACTA.INFO